

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

№ 3, 2014

Издается с 1989 г.
Выходит 4 раза в год

Учредители: Национальная академия наук Украины, Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины,
Международная ассоциация «Сварка» (издатель)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор

Б. Е. ПАТОН

О. И. Бойчук, Э. Ф. Гарф,

Е. А. Давыдов, А. Т. Зельниченко,

Л. М. Лобанов, З. А. Майдан (отв. секр.),

А. Я. Недосека (зам. гл. ред.), **Ю. Н. Посыпайко,**

В. А. Троицкий (зам. гл. ред.), **Е. В. Шаповалов**

(ИЭС им. Е. О. Патона, Киев, Украина)

В. А. Стрыжало

(Ин-т проблем прочности, Киев, Украина)

Н. П. Алешин

МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, РФ

В. Л. Венгринович

Ин-т техн. физики, Минск, Республика Беларусь

М. Л. Казакевич

Ин-т физической химии, Киев, Украина

О. М. Карпаш

Ив.-Франк. нац. техн. ун-т нефти и газа, Украина

В. В. Ключев

ЗАО НИИИИ МНПО «Спектр», Москва, РФ

З. Т. Назарчук, В. Н. Учанин

(Физ.-мех. ин-т, Львов, Украина)

Н. В. Новиков

Ин-т сверхтвердых материалов, Киев, Украина

Г. И. Прокопенко

Ин-т металлофизики, Киев, Украина

В. А. Стороженко

Харьков. нац. ун-т радиоэлектроники, Украина

С. К. Фомичов

Нац. техн. ун-т Украины «КПИ», Киев

М. Г. Чаусов

Нац. ун-т биорес. и природопольз. Украины, Киев

В. Е. Щербинин

ИФМ УрО РАН, Екатеринбург, РФ

Адрес редакции

03680, Украина, г. Киев-150, ул.Боженко, 11

ИЭС им. Е.О.Патона НАН Украины

Тел./факс: (044) 200-82-77, 205-23-90

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com

Научные редакторы

Е. А. Давыдов, Л. Ф. Харченко

Редакторы

Л. Н. Герасименко, Д. И. Середя, Т. В. Юштина

Свидетельство

о государственной регистрации

КВ4787 от 09.01.2001.

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

СОДЕРЖАНИЕ

Институту электросварки
им. Е. О. Патона НАН Украины – 80 3

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

- ПАТОН Б. Е., ЛОБАНОВ Л. М., НЕДОСЕКА А. Я.,**
НЕДОСЕКА С. А., ЯРЕМЕНКО М. А., ГЛАДЫШЕВ Ю. И.,
БЕШУН В. М., БЫЧКОВ А. В., ГАЙДУКЕВИЧ А. М.
О применении АЭ технологии при непрерывном монито-
ринге трубопроводов энергетических комплексов, рабо-
тающих при высокой температуре..... 7
- ЛОБАНОВ Л. М., ЗНОВА В. А., ПИВТОРАК В. А.,**
КИЯНЕЦ И. В. Технология неразрушающего контроля
качества элементов и узлов авиационных конструкций
методом электронной ширографии 15
- ЛОБАНОВ Л. М., ШАПОВАЛОВ Е. В., КОЛЯДА В. А.**
Применение современных информационных технологий
для решений задач автоматизации технологических
процессов 20
- ТРОИЦКИЙ В. А., КАРМАНОВ М. Н., ТРОИЦКАЯ Н. В.**
Неразрушающий контроль качества композиционных
материалов..... 29
- ПРОКОПЕНКО Г. И., МОРДЮК Б. Н., КНЫШ В. В.,**
СОЛОВЕЙ С. А., ПОПОВА Т. В. Повышение сопротив-
ления усталости и коррозионной стойкости сварных
соединений ультразвуковой ударной обработкой и элек-
троискровым легированием 34
- НЕКЛЮДОВ І. М., НАЗАРЧУК З. Т., СКАЛЬСЬКИЙ В. Р.,**
ДОБРОВОЛЬСЬКА Л. Н. Застосування методу акустичної
емісії для діагностування корпусів ядерних реакторів
(огляд). Повідомлення І. Еволюція застосування неруйнівного
контролю у світовій ядерній енергетиці 41
- ТЕТЕРКО А. Я., ГУТНИК В. И., ЛУЦЕНКО Г. Г.,**
ТЕТЕРКО А. А. Метод многопараметровых вихретоковых
измерений толщины, электропроводности материала
и толщины диэлектрического покрытия
элементов конструкций 55

ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ

- А. Я. Недосеке – 80**..... 61
- В. Р. Скальському – 60** 62
- От выборочного периодического неразрушающего
контроля состояния металла к мониторингу усталости
и нагруженности, управлению ресурсом металлических
конструкций и сооружений 64

ИЗДАНИЕ ПОДДЕРЖИВАЮТ:

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

Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief

B. E. PATON

O. I. Boichuk, E. F. Garf, E. A. Davydov,
A. T. Zelnichenko, L. M. Lobanov,
Z. A. Maidan (Executive Secretary)

A. Ya. Nedoseka (Deputy Editor-in-Chief),
Yu. N. Posypaiko,

V. A. Troitskii (Deputy Editor-in-Chief),

E. V. Shapovalov

(PWI of the NASU, Kiev, Ukraine)

V. A. Stryzhalo

(Institute for Problems of Strength, Kiev, Ukraine)

N. P. Aleshin

N.E.Bauman MSTU, Moscow, RF

V. L. Vengrinovich

Institute of Applied Physics, Minsk, Belarus

L. M. Kazakevich

Institute of Physical-Chemistry, Kiev, Ukraine

O. M. Karpash

Ivano-Frankovsk National Technical Institute of Oil
and Gas, Ukraine

V. V. Kluev

CJOSC NIIIB MNPO «Spektr», Moscow, RF

Z. T. Nazarchuk, V. N. Uchanin

(Physico-Mechanical Institute, Lvov, Ukraine)

N. V. Novikov

Institute for Superhard Materials, Kiev, Ukraine

G. I. Prokopenko

Institute of Metal Physics, Kiev, Ukraine

V. A. Storozhenko

Kharkov National University of Radioelectronics,
Ukraine

S. F. Fomichev

KPI National Technical University of Ukraine, Kiev

M. G. Chausov

National University of Bioresources and Nature
Management of Ukraine, Kiev

V. E. Sherbinin

IMF UrD RAS, Ekaterinburg, RF

Address

The E. O. Paton Electric Welding Institute
of the NAS of Ukraine,

11, Bozhenko str., 03680, Kyiv, Ukraine

Tel./Fax: (38044) 200-82-77, 200-23-90

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com

Scientific editors

E. A. Davydov, L. F. Kharchenko

Editors

L. N. Gerasimenko, D. I. Sereda, T. V. Ushtina

State Registration Certificate

KV 4787 of 09.01.2001.

All rights reserved.

«Техническая диагностика

і неразрушайущий контроль»

journal is republished cover-to-cover in English
under the title of «Technical Diagnostics
and Non-Destructive Testing» by Cambridge
International Science Publishing, UK.

CONTENTS

E.O.Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine is 80 3

SCIENTIFIC-TECHNICAL

PATON B. E., LOBANOV L. M., NEDOSEKA A. Ya.,
NEDOSEKA S. A., YAREMENKO M. A., GLADYSHEV Yu. I.,
BESHUN V. M., BYCHKOV A.V., GAIDUKEVICH A. M. On
application of AE technology at continuous monitoring of
piping of power units operating at high temperature 7

LOBANOV L. M., ZNOVA V. A., PIVTORAK V. A.,
KIYANETS I. V. Technology of non-destructive testing of the
quality of elements and components of aircraft structures by
electronic shearography 15

LOBANOV L. M., SHAPOVALOV E. V., KOLYADA V. A.
Application of modern information technologies to solve
problems of technological process automation 20

TROITSKII V. A., KARMANOV M. N., TROITSKAYA N. V.
Non-destructive testing of composite material quality 29

PROKOPENKO G. I., MORDYUK B. N., KNYSH V. V.,
SOLOVEJ S. A., POPOVA T. V. Improvement of fatigue and
corrosion resistance of welded joints by ultrasonic peening
treatment and spark alloying 34

NEKLYUDOV I. M., NAZARCHUK Z. T., SKALSKII V. R.,
DOBROVOLSKA L. N. Application of acoustic emission
method for diagnostics of nuclear reactor bodies (review).
Information I. Evolution of non-destructive testing application in
world nuclear power generation 41

TETERKO A. Ya., GUTNIK V. I., LUTSENKO G. G.,
TETERKO A. A. Method of multiparametral eddy current
measurements of thickness, electric conductivity of material
and thickness of dielectric coating of structural elements 55

NEWS AND INFORMATION

A. Ya. Nedoseka is 80 61

V. R. Skalskii is 60 62

From selective periodical non-destructive testing of metal
state to monitoring of fatigue and loading level and control of
service life of metal structure and constructions 64

JOURNAL PUBLICATION IS SUPPORTED BY:

Technical Committee on standartization «Technical Diagnostics
and Non-Destructive Testing» TC-78

Ukrainian Society for Non-Destructive Testing and Technical Diagnostic

ИНСТИТУТУ ЭЛЕКТРОСВАРКИ им. Е. О. ПАТОНА НАН УКРАИНЫ — 80



Академик Е. О. Патон

Институт электросварки создан академиком Евгением Оскаровичем Патонам в составе Всеукраинской Академии наук в 1934 г. на базе электросварочной лаборатории при Кафедре инженерных сооружений ВУАН и электросварочного комитета. Становление и вся последующая деятельность Института электросварки (ИЭС) связаны с именем этого выдающегося инженера и ученого. Он определил основные научные направления института в области технологии сварки и сварных конструкций, которые актуальны и сегодня.

Е. О. Патон сумел предвосхитить огромные перспективы развития технологии электрической сварки металлов. Убедительным подтверждением этого научного предвидения есть тот непреложный факт, что сегодня сварка является ведущим технологическим процессом неразъемного соединения металлических и неметаллических материалов. В этом отражается значительный вклад коллектива института за 80 лет его деятельности.

На первом этапе специалистами института была доказана принципиальная возможность изготовления сварных конструкций, не уступающих по своей прочности и надежности клепаным, а по ряду показателей значительно их превосходящих. Это послужило основой для массового применения сварки в дальнейшем. В 1930-е гг. в институте было научно обосновано представление о дуговой сварке как металлургическом процессе и под руководством Е. О. Патона проведены исследования по ее автоматизации. К 1940 г. была завершена разработка и начато внедрение на заводах страны высокопроизводительного процесса сварки под флюсом. Решающее значение приобрела автоматическая сварка под флюсом в годы Второй мировой войны. Непосредственно в цехах танкового завода на Урале сотрудники института разработали и внедрили технологию автоматической сварки броневой стали, позволившую создать поточное производство сварных корпусов танков Т34 и механизировать сварку другой военной техники.

Довоенный и военный этапы в деятельности института — период становления научной школы, убедительным подтверждением авторитета которой явилось присвоение институту в 1945 г. имени Евгения Оскаровича Патона.

Решение главной задачи — повышение производительности и уровня механизации сварочных работ — требовало непрерывного расширения в институте исследований по изысканию новых способов и приемов механизированной сварки, естественно, без сокращения работ по увеличению рациональных об-

ластей применения дуговой сварки под флюсом. Поиск возможности сварки под флюсом швов, расположенных в различных пространственных положениях, завершился созданием под руководством Е. О. Патона способа принудительного формирования сварного шва, который положил начало механизации дуговой сварки швов на вертикальной плоскости.

12 августа 1953 г. на 84-м году оборвалась жизнь Евгения Оскаровича Патона, человека, вписавшего яркую страницу в историю отечественной науки и техники. С 1953 г. и до настоящего времени директором института является его сын, академик Борис Евгеньевич Патон.

Одним из наиболее значительных достижений института начала 1950-х гг. стало создание новой технологии сварки плавлением металла больших толщин — электрошлаковой, которая в корне изменила технологию производства тяжелых станин, котлов, гидроагрегатов и других уникальных сварно-прокатных, сварно-литых конструкций. Ее применение позволило в значительном диапазоне толщин получить сварные соединения высокого качества.

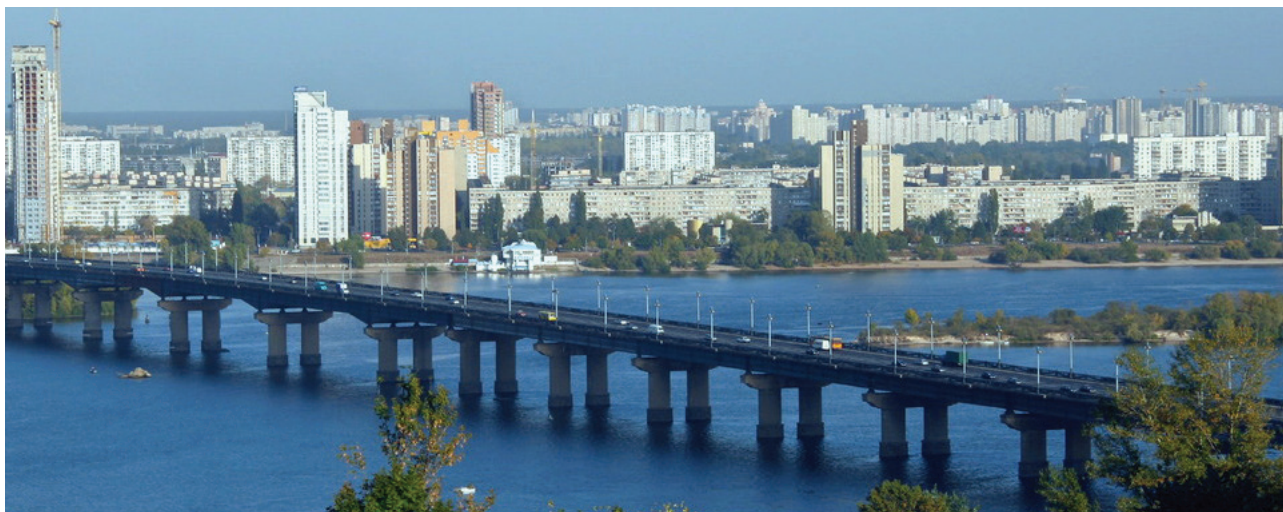
Позднее создан способ сварки в углекислом газе тонкой проволокой, получивший широкое применение в промышленности и обеспечивший значительный рост уровня механизации сварочных работ. Дальнейшим развитием газозащитной сварки плавящимся электродом стали разработка процесса и оборудования для импульсно-дуговой сварки, сварки в смесях активных и инертных газов.

В конце 1950-х гг. в институте активно начались исследования в области электронно-лучевой сварки. Усилия ученых были направлены на исследование физико-металлургических процессов при воздействии мощного (до 100 кВт) острофокусного пучка электронов на толстолистовые (150... 200 мм) конструкционные материалы. Особенно важной задачей, с которой институт успешно справился, являлась разработка технологии замыкания кольцевых швов, которая обеспечивала отсутствие корневых дефектов в виде раковин, пор и несплошностей. За последние 10 лет введено в промышленную эксплуатацию более 60 комплектов различного оборудования для ЭЛС, включая установки с объемом вакуумных камер до 100 м³.

Дальнейшим этапом развития лучевой технологии явилось ее применение для целей сварки и резки лазером. Проводятся систематические исследования в области импульсной и непрерывной лазерной сварки. В последнее время специалистами институ-



Академик Б. Е. Патон



та разработаны гибридные источники нагрева — лазер–дуга, лазер–плазма.

Получили развитие исследования по всем основным направлениям сварки давлением — стыковой контактной оплавлением и сопротивлением, точечной сварке, трением, диффузионной сварке.

Изучены физические и технологические особенности новых технологических процессов контактной сварки оплавлением, созданы системы автоматического управления и диагностики качества соединений. На базе новых технологий разработано и освоено производство нескольких поколений специализированных и универсальных машин для контактной стыковой сварки деталей широкого сортамента из низколегированных и высокопрочных сталей с площадью поперечного сечения до 200 тыс. мм², а также сплавов алюминия, титана, хрома, меди. Наиболее массовое применение нашли машины для сварки рельсов различных категорий в полевых и стационарных условиях, выпускаемые серийно на Каховском заводе электросварочного оборудования, машины для сварки труб диаметром от 150 до 1420 мм при строительстве магистральных трубопроводов, установки для сварки элементов конструкций аэрокосмической техники. Оборудование для контактной сварки рельсов экспортируется во многие страны мира.

На протяжении многих лет институт проводит исследования по сварке в космосе. В 1969 г. на борту космического корабля «Союз-6» летчик-космонавт В. Кубасов впервые в мире осуществил уникальный эксперимент по сварке электронным лучом, плазмой и плавящимся электродом на установке «Вулкан», созданной в ИЭС. Так было положено начало космической технологии, имеющей большое значение в программе освоения космического пространства. В 1984 г. был проведен чрезвычайно важный, подготовленный институтом, эксперимент на борту орбитальной станции в открытом космосе. Космонавты С. Савицкая и В. Джанибеков впервые в открытом космосе с помощью ручного электронно-лучевого инструмента выполнили сварку, пайку, резку и напыление.

Параллельно в институте решалась и такая сложная проблема, как механизация дуговой сварки под водой, которая приобрела большое значение в связи

с освоением шельфа Мирового океана. Специалисты института создали оборудование для механизированной дуговой сварки и резки специальной порошковой проволокой на глубинах до 200 м.

Интенсивное развитие современной техники сопровождается постоянным расширением сортамента конструкционных металлов и сплавов для сварных конструкций. В ходе исследований по изучению процессов, протекающих в сварочной ванне, созданы новые сварочные материалы: электроды, металлические и порошковые проволоки, флюсы, газовые смеси.

Исследования и научные разработки в области прочности сварных соединений и конструкций являются традиционными направлениями в тематике института, начало которым было положено Е. О. Патонов. Сегодня эти исследования носят многоплановый характер, что позволяет разрабатывать новые эффективные методы повышения надежности ответственных инженерных сооружений при статическом и циклическом нагружении. Проблема создания надежных сварных конструкций охватывает также вопросы выбора материалов, рациональных конструктивных решений, технологии изготовления и монтажа, снижения металлоемкости, которые институт успешно решает в содружестве со многими отраслевыми организациями и предприятиями. В последнее время ведутся интенсивные работы по повышению надежности, долговечности и ресурса сварных конструкций, а также созданию эффективных методов их диагностики.

Сегодня системы непрерывного мониторинга, созданные в институте, успешно работают на ряде нефтехимических производств с использованием связи по системе Интернет. Это позволяет строить контрольные и управляющие системы, которые дают возможность независимо от места расположения эксплуатирующейся конструкции наблюдать за ее состоянием из единого специализированного диагностического центра.

С начала 1950-х гг. по инициативе академика Б. Е. Патона в институте развернуты поисковые исследования и экспериментальные разработки по выявлению возможности использования свароч-

ных источников нагрева для получения металлов и сплавов особо высокого качества и надежности, на основе которых сформировалось еще одно основное научное направление в деятельности института: специальная электрометаллургия. Усилия и успехи коллектива в этой новой области обеспечили заметное продвижение в развитии современной качественной металлургии.

К новым электрометаллургическим процессам в первую очередь относится электрошлаковый переплав расходного электрода в водоохлаждаемую изложницу. Фундаментальные исследования электрошлакового процесса, его физико-химических, металлургических и электротехнических особенностей обеспечили передовые позиции института в разработке и применении электрошлаковой технологии, включая переплав, наплавку, литье, подпитку и др.

В последние годы в институте выполнен комплекс научно-исследовательских работ, послуживших основой для разработки нового поколения электрошлаковых технологий, основанных на получении слитков и заготовок непосредственно из жидкого металла без переплава расходных электродов. Эти технологии запатентованы в Украине и за рубежом и реализованы в промышленности. В частности, на Ново-Краматорском машиностроительном заводе на основе этих технологий создан уникальный комплекс по производству биметаллических прокатных валков.

В институте созданы еще две электрометаллургические технологии: плазменно-дуговая и электронно-лучевая. Разработка техники и технологии этих переплавных процессов велась параллельно с фундаментальными исследованиями физико-металлургических особенностей рафинирования в контролируемой атмосфере или вакууме и процессов кристаллизации сталей, сложнотлегированных сплавов, цветных и тугоплавких металлов.

Плазменно-дуговой переплав, благодаря систематическим исследованиям высокотемпературных систем газ–металл, открыл широкие возможности для производства нового класса конструкционных материалов — высокоазотистых сталей. Создание мощных плазмотронов для металлургии позволило институту «войти» в большую металлургию — были разработаны новые конструкции установок типа «ковш–печь» емкостью до 100 т. Качество металла, полученного в этих установках, не уступает электрошлаковому.

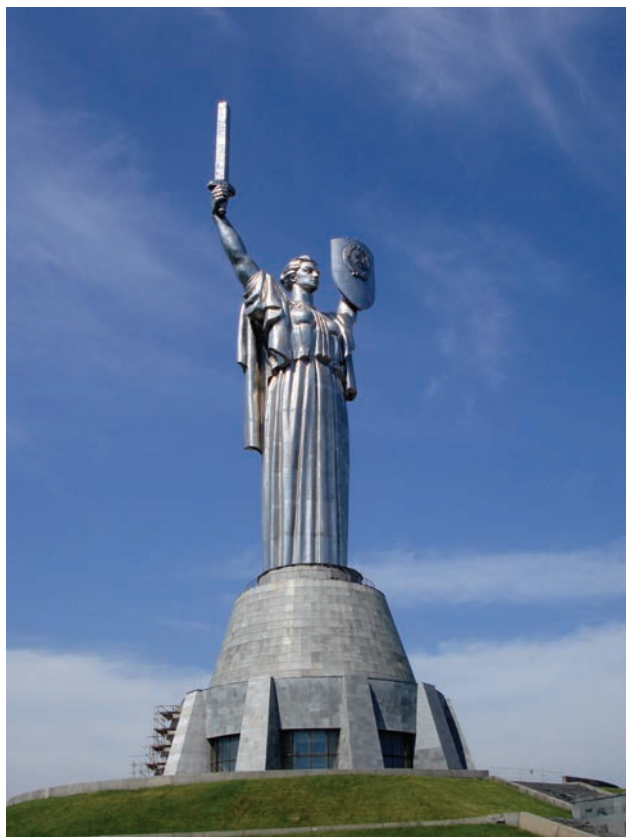
Совместными усилиями ученых института, отраслевых НИИ и производителей создана совершенная электронно-лучевая техника, а технология электронно-лучевого переплава в вакууме стала незаменимым процессом получения особо качественных материалов в металлургии и машиностроении. Работы в этом направлении в настоящее время сконцентрированы в созданном при институте научно-инженерном центре «Титан».

Исследования процесса испарения в вакууме металлических и неметаллических материалов и их последующей конденсации как основы для паровфазной металлургии открыли возможность получения покры-

тий из различных материалов, включая жаростойкие, тугоплавкие и композитные, позволили в широких пределах регулировать состав, структуру и свойства осажденных слоев. Толщина наносимых покрытий в зависимости от назначения регулируется от десятка микрон до нескольких миллиметров.

В начале 1980-х гг. в институте формируется новое научное направление, связанное с созданием новых и совершенствованием существующих технологических процессов термического нанесения защитных и износостойких покрытий. В настоящее время институт развивает практически все современные процессы нанесения защитных и упрочняющих покрытий. Разработаны технология и установки для плазменно-дугового напыления износостойких покрытий, а также установки для детонационного напыления, которые могут эксплуатироваться с применением различных рабочих газов (ацетилена, пропана, водорода).

Результатом исследований и разработок в области строительных сварных конструкций, выполненных учеными ИЭС, стало создание ряда выдающихся сооружений, к которым прежде всего относится уникальный цельносварной мост имени Е. О. Патона через Днепр. Принципы, подходы и конструктивно-технологические решения, используемые при его проектировании и сооружении, открыли дорогу широкому применению сварки в мостостроении. Этот мост получил признание Американского сварочного общества как выдающаяся сварная конструкция XX столетия. Опыт строительства моста имени Е. О. Патона использован при постройке мостов через Днепр в Киеве (Южного, Московского, Гаваньского,





Подольско-Воскресенского, автодорожного и железнодорожного мостов) и мостов в Днепропетровске и Запорожье, а также моста через реку Смотрич в Каменец-Подольске. Совместно с НИИ «Укрпроект-стальконструкция» разработаны проекты и технологии строительства, которые успешно реализованы при возведении уникальных телевизионных башен в Киеве, Санкт-Петербурге, Ереване, Тбилиси, Витебске, Харькове. Технологии сварки, разработанные в ИЭС, были успешно применены при возведении грандиозного монумента «Родина-мать», а также при строительстве объектов Евро-2012 в Киеве.

В последние годы большое внимание уделяется реализации достижений современной науки и техники в практической медицине. В 1990-х гг. Б. Е. Патон предложил использовать сварку для соединения живых тканей и организовал творческий коллектив ученых ИЭС им. Е. О. Патона, Института хирургии и трансплантологии им. А. А. Шалимова, Центрального госпиталя Службы безопасности Украины и других медицинских учреждений. Это сотрудничество позволило создать новый способ соединения (сварки) мягких живых тканей. В ИЭС разработано современное оборудование для сварки живых тканей нескольких поколений и налажено его производство. Способ электросварки живых тканей применяется более чем в 50 клиниках Украины, с 2001 г. выполнено более 100 тысяч хирургических операций различного профиля, разработаны и применяются на практике более 130 новых хирургических методик.

Благодаря сочетанию целенаправленных фундаментальных теоретических исследований с инженерно-прикладными разработками, тесным творческим связям с промышленными предприятиями в реализации технологических новшеств институт за прошедшие 80 лет своей деятельности превратился в крупнейший в стране и мире научно-исследовательский центр в области сварки и родственных технологий.

Сегодня в институте работает 1560 человек. Научный потенциал института составляют 440 научных сотрудников, среди которых 8 академиков и 4 члена-корреспондента НАН Украины, 72 доктора наук и более 200 кандидатов наук.

Результаты работ института подтверждены лицензиями и полученными патентами, — продано более 150 лицензий в США, Германию, Японию, Россию, Швецию, Францию, Китай и др. Получено около 2600 патентов Украины и стран ближнего и дальнего зарубежья, а также более 6500 авторских свидетельств.

За годы деятельности института более 60 наиболее выдающихся разработок, выполненных и внедренных в народное хозяйство сотрудниками института в содружестве с производственными коллективами, удостоены ленинских и государственных премий, а также различных премий Украины.

Институт поддерживает международные связи с ведущими центрами по сварке в Европе, США, Азии, является членом Международного института сварки и Европейской сварочной федерации.

Результаты исследований ученых института постоянно публикуются в журналах «Автоматическая сварка», «Техническая диагностика и неразрушающий контроль», «Современная электрометаллургия», «The Paton Welding Journal», которые имеют широкую читательскую аудиторию. В институте издаются также монографии, тематические сборники, труды конференций, справочники и другая книжная продукция. В институте работают специализированные советы по защите докторских и кандидатских диссертаций. Сотрудниками института защищено более 139 докторских и около 720 кандидатских диссертаций. Институт проводит различные конференции и семинары, организывает и принимает участие в национальных и международных выставках.

Благодаря внедрению разработок ИЭС в промышленность в Украине создано производство современных сварочных материалов и оборудования, что позволяет говорить о сварке как об одной из немногих отраслей национальной экономики, имеющей стабильный положительный внешнеторговый баланс.

За прошедшие 80 лет коллектив института прошел славный путь. Сегодня — это коллектив единомышленников, приумножающий успехи патоновской научной школы, которая имеет мировое признание. Все направлено на дальнейшее развитие сварки и родственных процессов, а также решение базовых проблем промышленного производства.



О ПРИМЕНЕНИИ АЭ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ МОНИТОРИНГЕ ТРУБОПРОВОДОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ, РАБОТАЮЩИХ ПРИ ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

Б. Е. ПАТОН, Л. М. ЛОБАНОВ, А. Я. НЕДОСЕКА, С. А. НЕДОСЕКА, М. А. ЯРЕМЕНКО

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Ю. И. ГЛАДЫШЕВ, В. М. БЕШУН, А. В. БЫЧКОВ, А. М. ГАЙДУКЕВИЧ

СВП «Киевские ТЭЦ» ПАО «Киевэнерго». 01001, г. Киев, пл. И. Франко, 5. E-mail: kanf@kievenergo.com.ua

Рассмотрены вопросы применения на основе метода акустической эмиссии (АЭ) непрерывного мониторинга трубопроводов горячего промперегрева пара в процессе эксплуатации с прогнозированием разрушающей нагрузки. Проанализированы возможности внедрения АЭ метода для непрерывного мониторинга паропроводов энергоблока № 1 Киевской ТЭЦ-6. Исследованы акустические свойства материала паропроводов. Проведены предварительные АЭ высокотемпературные исследования материала паропроводов. Выполнены монтаж и испытания системы непрерывного АЭ мониторинга, запуск ее в режим опытной эксплуатации, коррекция настроек на основе полученных результатов измерений. Показано, что прогнозируемая системой непрерывного АЭ мониторинга разрушающая нагрузка определяется с достаточной для практики точностью. Представлена схема контроля и особенности практического применения системы. Библиогр. 21, табл. 1, рис. 6.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, непрерывный мониторинг, трубопровод, высокие температуры, прогноз, энергоблок, разрушающая нагрузка

Трубопроводы, работающие в условиях высоких температур, являются промышленными объектами повышенной опасности. В процессе эксплуатации металл, из которого они изготовлены, накапливает повреждения, которые вызваны, в частности, нарушением эксплуатационных режимов, изменяющимися нагрузками, коррозионными и химическими процессами и рядом других факторов. Как правило, прямой зависимости между сроком эксплуатации трубопровода и степенью его поврежденности не существует, достаточно трудно также разделить поврежденность, вызванную действием каждого из определяющих факторов. В связи с этим наиболее перспективной представляется интегральная оценка поврежденности материала, без детализации факторов, вызвавших повреждения, главной задачей которой является предотвращение аварий. Независимо от причин возникновения аварий, их последствия могут быть весьма серьезными, поэтому для обеспечения надежной эксплуатации конструкций становится актуальным непрерывный контроль работоспособности и ее прогнозирование на период времени, необходимый для предотвращения опасности.

Это во многом объясняется тем, что расчеты несущей способности конструкций и конструктивных элементов, обеспечивающие достаточную эксплуатационную их надежность, затруднены по ряду причин, важнейшими из которых являются:

- недостаточная изученность, неполнота либо недостоверность исходных данных для выполнения расчетов;
- сложность, а чаще невозможность оперативного получения в процессе эксплуатации данных о текущем состоянии конструкций, особенно при сложном нагружении;
- опасность, а иногда и невозможность проведения экспериментов с целью определения несущей способности;
- недоступность в некоторых случаях объектов с целью проведения надежного неразрушающего контроля.

Вследствие этого в любой, даже прошедшей текущие испытания, конструкции существуют проблемные области, обоснование эксплуатационной надежности которых, особенно после длительной эксплуатационной наработки, является достаточно сложным, а иногда просто невозможным.

Эффективным средством для решения задачи обеспечения эксплуатационной надежности конструкций является создание информационно-измерительных систем, позволяющих оценить ее еще на стадии испытаний в условиях предстоящей эксплуатации, а также контролировать работоспособность этой конструкции непосредственно в процессе работы.

Современное развитие средств вычислительной техники, радиоэлектроники, прикладной ма-

© Б. Е. Патон, Л. М. Лобанов, А. Я. Недосека, С. А. Недосека, М. А. Яременко, Ю. И. Гладышев, В. М. Бешун, А. В. Бычков, А. М. Гайдукевич, 2014



тематики, техники испытаний, науки о прочности материалов и механики сплошной среды позволяют на достаточно высоком уровне решить задачу непрерывного контроля работоспособности конструкций в процессе эксплуатации.

Для работы информационно-измерительных систем необходимо регулярное получение оперативных данных, прежде всего о состоянии узлов конструкции и различного рода дефектов, которые накапливаются при эксплуатации. При наличии данных о конструкции и соответствующей обработки этой информации можно оценивать ее несущую способность оперативно, в реальном режиме времени. Это, в частности, дает возможность получить большие технические и экономические выгоды в тех областях техники, где из-за незнания истинных эксплуатационных нагрузок, истинного состояния материала конструкции, изменяющегося в процессе ее эксплуатации, могут возникнуть существенные ошибки при назначении рабочих параметров.

В настоящее время достаточно широко применяются автоматические системы управления на основе наблюдения за ходом технологических процессов, связанных с переработкой, получением или использованием в энергетических циклах тех или иных продуктов. В то же время контролю состояния конструкций, используемых для осуществления этих процессов, уделяется значительно меньше внимания. Как правило, оценка работоспособности конструкции проводится при регламентированной остановке процесса производства, с выполнением ряда технологических операций по обеспечению технической возможности контроля. Чаще всего провести 100%-ный контроль конструкции не удается из-за чрезвычайно большого объема и стоимости работ, связанных с его выполнением. Как правило, для контроля выбираются лишь отдельные участки, которые не всегда соответствуют наиболее поврежденным местам конструкции.

Для решения задачи контроля конструкций может быть с успехом использован метод АЭ, возникающей в материалах при критическом сочетании некоторых факторов воздействия, приводящим к появлению или развитию дефектов. Особенностью метода является возможность контролировать состояние материала на больших расстояниях от мест размещения датчиков, выполнять малым числом датчиков контроль крупных промышленных объектов, в том числе сложной геометрии и на участках, доступ к которым затруднен (подземных, покрытых изоляцией). Рассмотрим, как можно применить и какие получить результаты с использованием метода АЭ при непрерывном контроле высокотемпературных узлов тепловых станций.

Как известно, разрушение материалов энергетических установок, работающих в условиях ползучести при высоких температурах, характеризуется возникновением и развитием на границах зерен сначала микротрещин, затем постепенным превращением их в поры с последующим слиянием пор и образованием магистральной трещины, приводящей к разрушению материала [1–8].

На рис. 1 представлен график накопления пор в процессе эксплуатации стали 12Х1МФ, достаточно широко применяемой в системах трубопроводов тепловых станций.

Из графика видно, что чем больше приближается время эксплуатации к критическому (t_k), тем большее количество образуется в металле пор, которые, соединяясь, в конечном счете образуют магистральную трещину. Изменение рабочей температуры в рассмотренных авторами пределах [2] незначительно влияет на механизм порообразования. В то же время величина относительного удлинения стали 12Х1МФ зависит от температуры и чем выше рабочая температура, тем выше относительное удлинение.

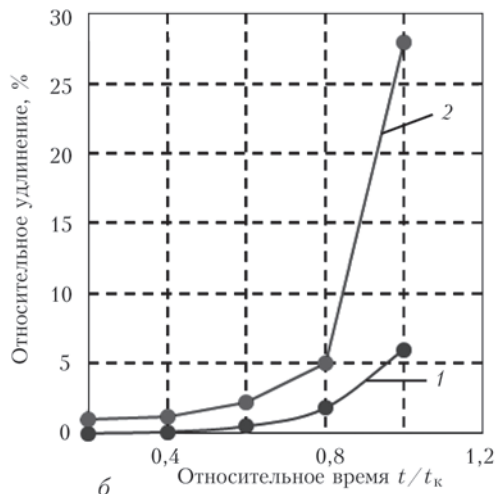
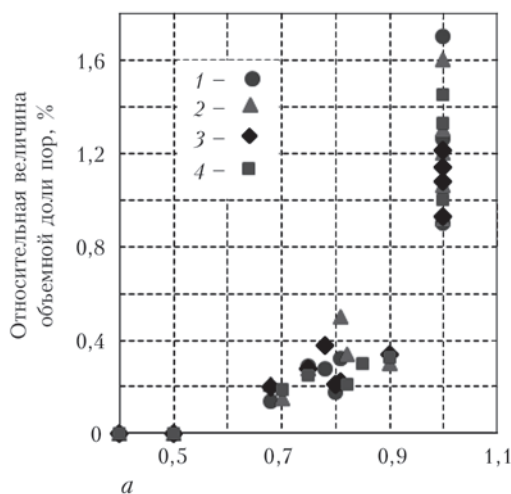


Рис. 1. Повреждаемость порами при ползучести (а: 1 – 550; 2 – 573; 3 – 600; 4 – 625 °С) и ползучесть стали 12Х1МФ (б: 1 – 550; 2 – 625 °С) [2]



Испытание материалов с применением метода АЭ показало, что образование и слияние пор в процессе разрушения материала при высоких температурах происходит также дискретно, как и при нормальных. На рис. 2 представлен график испытания стали 15X1M1Ф при температуре 560 °С. График демонстрирует явно выраженный дискретный характер развития процесса разрушения материала при этой температуре. Исследования разрушения материалов при растяжении в диапазоне температур 350...915 °С показали те же результаты.

Следовательно, методика АЭ контроля может быть использована и при оценке состояния материалов, работающих при высоких температурах [9–12]. На графике рис. 2: P – растягивающая нагрузка (синяя кривая); A – амплитуда АЭ сигналов, возникающих при разрушении материала (зеленая) и Rt – АЭ параметр «райс тайм», характеризующий «жесткость» процесса разрушения (розовая). Из графика видно, что с ростом нагрузки интенсивность разрушения материала и его жесткость изменяются в широких пределах. Это свидетельствует о явно выраженном дискретном характере разрушения и о влиянии на него постоянно изменяющегося упрочнения материала [13].

Изложенные выше рассуждения в полной мере относятся к материалам труб и, в частности, паропроводов, работающих в условиях высоких температур, например, на предприятиях теплоэнергетического комплекса. Проводимые в последнее время исследования показали возможность и эффективность применения метода АЭ в условиях высоких температур, в том числе промышленного применения на действующих трубопроводах тепловых станций.

Первичным в цепи этапов обеспечения надежности конструкций и оборудования в процессе эксплуатации должен служить их непрерывный мониторинг, получение непрерывного потока информации об их состоянии. С учетом позитивных результатов предварительно проведенных исследований и уже имеющегося опыта промышлен-

ного применения и существующей методики контроля [14–16], было принято решение о создании системы непрерывного АЭ мониторинга трубопровода горячего промперегрева пара киевской станции ТЭЦ-6.

Система была установлена на трубопроводе с диаметром труб 630 мм и толщиной стенки 25 мм. Материал труб – сталь 15X1M1Ф. Всего установлено 16 АЭ датчиков (на двух нитках трубопровода длиной по 120 м каждая).

Учитывая высокую температуру, при которой работает трубопровод, датчики устанавливали на волноводах длиной 500 мм (рис. 3). Расстояние между АЭ датчиками составляет 20 м. Кроме того, датчиками 15 и 16 выполняется контроль соединительного трубопровода диаметром 370 мм и с толщиной стенки 17 мм, выполненный из стали 12X1MФ.

В соответствии с техническими требованиями и представленными в техническом задании схемами выполнены монтаж системы непрерывного мониторинга, ее подключение к энергообеспечению и компьютерной сети предприятия. Выполнены необходимые подготовительные мероприятия для запуска в опытную эксплуатацию. Выполнено подключение аппаратного и управляющего блоков в общую сеть контроля; система непрерывного мониторинга была запущена в режим опытной эксплуатации.

Основными задачами при прохождении системой непрерывного мониторинга периода опытной эксплуатации является установление оптимальных настроечных параметров, режимов эксплуатации системы, особенностей, связанных с работой системы на данном объекте, а также устранение выявленных неполадок. Контроль в период опытной эксплуатации является периодически-непрерывным. Это означает, что система периодически должна запускаться в режиме непрерывного мониторинга и периодически проводят разовые испытания объектов контроля.

Контроль, как непрерывный, так и периодический, выполнялся, в частности, на рабочих режи-

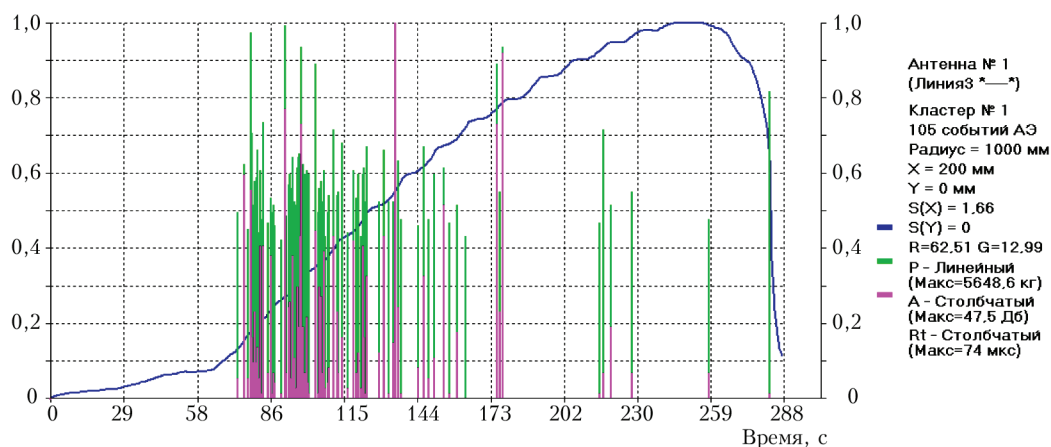


Рис. 2. Испытание на растяжение образца из стали 15X1M1Ф при температуре 560 °С



Рис. 3. Установка АЭ датчиков (а) на трубопроводе: датчик 1 в специальном коробе, установленном на приваренном к трубопроводу волноводе 2; соединительный кабель в гибкой изоляции 3 (б), в жестком коробе 4 (в)

мах трубопровода при давлении пара в трубе, равном 22 ат, температуре пара 542 °С. В процессе испытаний системой мониторинга автоматически определяли места повышенной опасности и выполняли прогноз разрушающей нагрузки [17, 18].

Работы по запуску смонтированной системы в эксплуатацию начали с прозвучивания подконтрольных участков трубопроводов импульсными сигналами от специального генератора для того, чтобы убедиться в необходимой чувствительности системы и наличии акустической связи между соседними датчиками АЭ. Предварительные тесты показали высокую чувствительность системы, что сделало возможным сформировать так называемые локационные антенны из групп датчиков, установленных на смежных участках трубопроводов, обеспечивающих нужный акустический контакт. Таким образом, сформированы три акустические антенны, в которые входят следующие датчики (номера каналов по схеме подключения к АЭ прибору): антенна 1 – номера с 1 по 7; 2 – с 8 по 14; 3 – 15 и 16.

Учитывая конфигурацию расположения датчиков, для всех трех антенн выбран линейный режим локации. Для поступающей информации, идентифицируемой как события АЭ, предусмотрен кластерный анализ, позволяющий объединять события по координатному и ряду других признаков. Применение такого подхода для реальных конструкций, особенно при сложной геометрии объектов и в условиях наличия помех, является очень эффективным [19, 20]. При наличии существенного разброса в определенных координатах событий, с высокой вероятностью принад-

лежащих к одному и тому же процессу в материале, объединение их в кластер позволяет наиболее точно указать место возникновения их источника. Особенно это важно для тех участков трубопровода, доступ к которым по техническим причинам невозможен. Необходимо учитывать, что оборудование промышленных предприятий является источником акустических и электромагнитных помех, которые могут влиять на качество передаваемой при мониторинге информации. Дополнительными источниками помех могут послужить проводимые рядом с объектами контроля ремонтные, монтажные, сварочные и другие виды работ. Для решения этих вопросов были созданы специальные программы, позволяющие максимально снизить влияние шумового фона на работу основного алгоритма, используемого при контроле.

Испытания начаты в холодный сезон, при рабочих параметрах работы трубопроводов и продолжены после их разгрузки. Уже предварительные данные показали высокую информативность метода, но и определенные проблемы в настройке системы в условиях высоких технологических шумов.

Сначала происходило тестирование и установка аппаратных режимов, т. е. таких, которые непосредственно влияют на получение информации и не могут быть изменены во время компьютерной повторной обработки полученных данных. Прежде всего были протестированы режимы работы с различными коэффициентами усиления и установлено, что оптимальные данные АЭ получены при работе в логарифмическом режиме усилителей, в котором они предварительно и настроены работать. Следующие тесты касались уровня и типа порогов амплитудной дискриминации. Учитывая данные первичных испытаний и высокий уровень шумов самого объекта контроля, установлено, что оптимальными настройками порогов являются плавающие, т. е. порог автоматически меняется вслед за общим уровнем шума, зафиксированным конкретным датчиком. Оптимальный плавающий порог должен незначительно превышать текущий уровень шума на датчике. Коррекция величины порога происходит каждые 30 с. При таких настройках была обеспечена нужная чувствительность измерений, но поток информации с учетом значительных шумов поступал слишком высокий, поэтому возник вопрос дополнительной фильтрации данных, который был решен на основе дополнительных тестов на объекте и анализа данных испытаний образцов из материалов – аналогов в условиях высоких температур [3–5]. В частно-



Рис. 4. АЭ активность трубопровода в рабочем состоянии через 1 ч от начала контроля при первоначальных настройках системы (а), без использования фильтров (б)

сти, рассмотрена эффективность фильтрации по таким параметрам сигналов АЭ как амплитуда и время нарастания (райс тайм) [19].

Предварительными результатами по использованию фильтрации показано следующее:

- применение фильтрации по амплитуде приводит к снижению количества событий АЭ, которые попадают в сложившиеся кластеры. Соответственно уровни предупреждений снижаются;
- при применении фильтрации по амплитуде отбраковывается часть событий АЭ, соответствующих истинным источникам АЭ в материале трубопроводов;
- при подъеме нижней границы фильтра по амплитуде выше 60...65 дБ события АЭ отбраковываются почти полностью, при установке ее ниже 55 дБ фильтр не является эффективным;

– в настройках мониторинга эффективно может быть использован фильтр по параметру «райс тайм»;

– фильтрация по данному параметру приводит к снижению уровня предупреждений, при этом активные источники АЭ формируют кластеры и могут быть четко выделены из общего шумового фона;

– аналогичным образом были проанализированы возможность и эффективность фильтрации по длительности, частоте, скорости сигналов АЭ и выбраны оптимальные полосы фильтрации, обеспечивающие достаточность информации для поиска опасных мест и генерирования соответствующих предупреждений. Поскольку после перехода к штатной эксплуатации предполагается использовать прогнозирование разрушающей нагрузки по

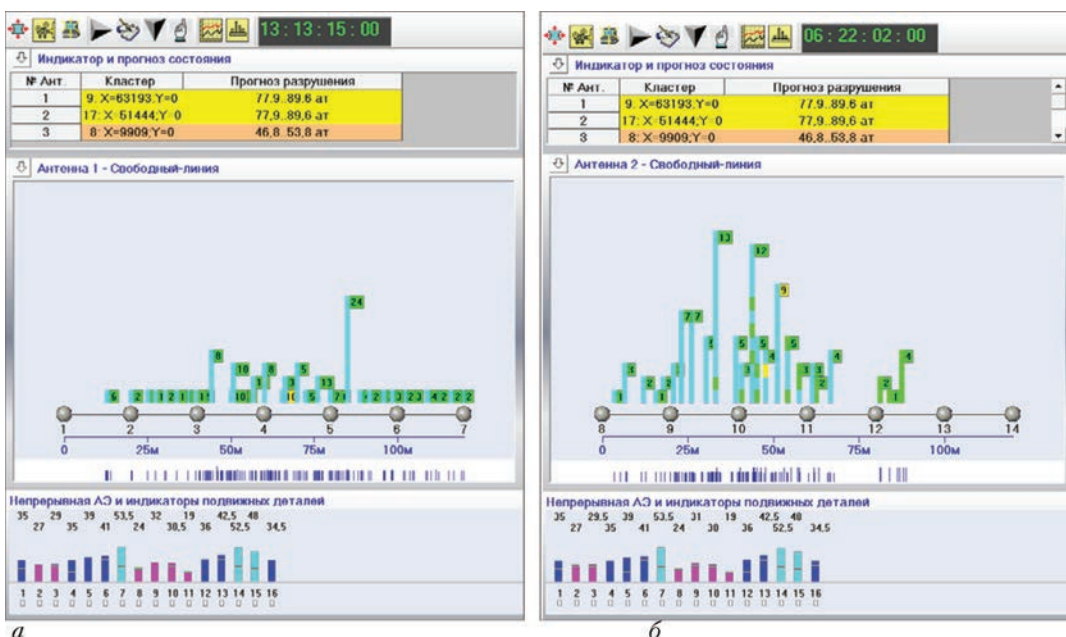


Рис. 5. Состояние АЭ активности двух ниток трубопровода в рабочем состоянии через 13 ч 13 мин (антенна 1) (а) и 6 ч 22 мин (антенна 2) (б) от начала контроля (сверху в таблице представлены величины прогнозируемой предельной нагрузки)



Действия персонала при различных показаниях индикатора опасности

Уровень предупреждения	Цвет индикатора	Действия персонала
1	Зеленый	Штатный режим. Продолжить эксплуатацию.
2	Желтый	Внимание. При появлении прогнозируемого разрушающего уровня давления и превышении его над рабочим более чем в два раза – продолжить эксплуатацию.
3	Оранжевый	Оценить прогнозируемый разрушающий уровень давления по показаниям индикатора. При превышении прогнозируемого уровня над рабочим менее чем в два раза повысить внимание. При уменьшении прогнозируемого давления до 1,3 от рабочего – остановить эксплуатацию. Провести дополнительную проверку проблемного узла.
4	Красный пульсирующий	Остановить эксплуатацию. После появления прерывистого звукового сигнала немедленно снизить нагрузку.

Примечание. Данные таблицы получены для аппаратуры с техническими характеристиками ЕМА 3.9

данным АЭ, на полученных данных выполнены проверки задействованных в системе алгоритмов прогнозирования. При этом прогноз и предупреждение об опасности происходит согласно приведенным таблицам. Расчет прогнозной разрушающей нагрузки выполняется автоматически.

Действия персонала в соответствии с показателями индикатора опасности во время непрерывного мониторинга регламентируются таблицей.

Тестовые испытания смонтированной системы проводили в стандартном режиме непрерывного мониторинга и в виде разовых испытаний. Стандартный режим предусматривает автоматическое сохранение файлов продолжительностью 30 мин с последующим началом записи нового файла.

Такой режим, с одной стороны, позволяет легко находить на жестком диске управляющего компьютера данные за нужное время и гарантировать надежность хранения информации, меньше нагружать процессор компьютера и оперативную память. С другой стороны, система является достаточно надежной для получения и хранения в едином файле значительных объемов информации. Одним из показателей надежности системы является обеспеченность запаса мощности компьютера для обработки и хранения больших, чем при стандартных испытаниях, объемов данных. Поэтому было проведено несколько тестов, самый длительный из которых предусматривал непрерывный анализ информации и запись ее в единый файл в течение суток, и еще нескольких файлов продолжительностью более 10 ч.

На рис. 4 представлены некоторые элементы окна программы, выполняющей мониторинг, после 1 ч контроля трубопровода в рабочем состоянии при первоначальных, стандартных настройках системы. Представленные на схеме столбики отражают места концентрации АЭ событий в каждом контролируемом кластере. Цифры на флажках показывают количество АЭ событий в кластере, цвет флажков указывает на степень опасности протекающего в кластере процесса разрушения.

Над схемой кластеров в окне прогнозирования в специальной таблице для трех антенн, контролирующей всю систему трубопроводов, представлена цветом опасность ситуации на определенном участке трубопровода в данный момент времени. Показаны координаты наиболее опасных мест на всем трубопроводе общей длиной 240 м (по антеннам 1, 2) и прогнозируемые разрушающие давления в этих местах трубопровода. Антенна 3 контролирует участок трубопровода из стали 12Х1МФ длиной 20 м диаметром 377 мм с толщиной стенки 17 мм.

В нижней части экранов приведены мгновенные значения непрерывной эмиссии, регистрируемой каждым контролирующим АЭ датчиком. Интенсивность эмиссии ранжирована высотой столбца и цветом.

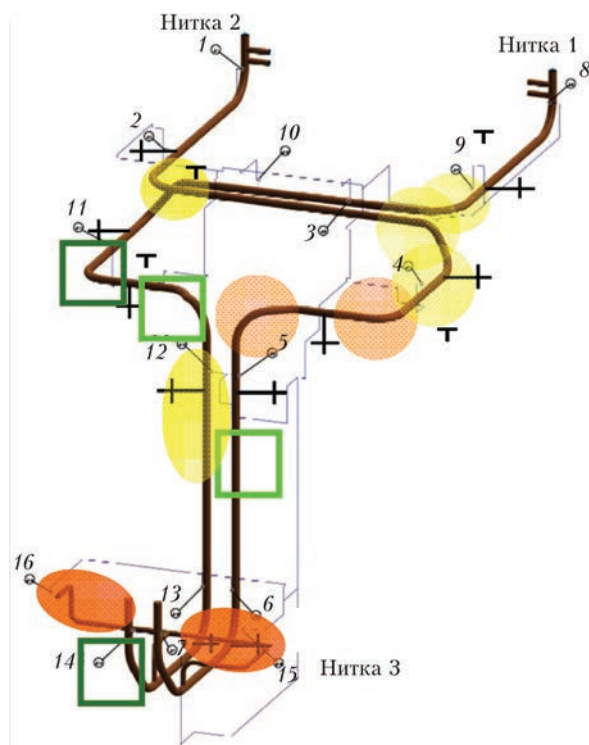


Рис. 6. Схема трубопровода ГПП с местами повышенной АЭ активности (цифрами указаны номера АЭ датчиков, крестиками – технологические отметки)



Отметим, что данные на рис. 4 были получены до оптимизации настроек, в связи с чем представленная информация, включая показания индикаторов и результаты прогноза разрушения, рассматривалась как первоначальный этап для дальнейшей калибровки системы. Полученные результаты важны самим наличием АЭ данных и принципиальной возможностью обеспечить индикацию опасности, прогноз разрушения, чтобы затем на этой основе выполнить необходимую коррекцию настроек системы таким образом, чтобы результаты соответствовали физическому состоянию контролируемого материала.

На рис. 5 схематически приведена часть трубопровода, контролируемая антенной 1 и 2 (нитка № 1 и 2 длиной по 120 м). Показаны датчики, начиная от 1 до 14. Ниже показана условная шкала расстояний от 0 до 100 м на каждом участке. Представленные на рис. 5 данные получены после детального исследования влияния помех и технологических шумов на результаты мониторинга. На основании данных мониторинга и высокотемпературных испытаний образцов были получены данные о наиболее эффективных способах фильтрации по параметрам получаемых событий АЭ, затем к уже полученным данным применены соответствующие фильтры. Проведена также необходимая коррекция настроек прогноза разрушения.

Представленные на рис. 5 данные являются весьма показательными, поскольку запись АЭ с соответствующим анализом и прогнозом разрушения велась достаточно длительное время, что послужило дополнительной проверкой работоспособности системы в целом при достаточно больших потоках вводной информации, а также правильности выбранных настроек.

Как видим, АЭ активность материала при его деформировании имеет различные значения в разных точках трубопроводов. Система мониторинга выбирает наиболее слабые места и автоматически, в реальном времени рассчитывает прогнозную разрушающую нагрузку.

Наибольшая АЭ активность соответствует участку между 8 и 12 датчиками. Первая и вторая антенны показывают координаты 63 и 51 м с наибольшей АЭ активностью. В то же время прогнозируемые разрушающие нагрузки в несколько раз превышают рабочие нагрузки, что свидетельствует о возможности дальнейшей эксплуатации трубопровода этих ниток (цвет желтый). Антенна 3 контролирует участок трубопровода, находящийся в худших условиях по сравнению с 1 и 2 участками. В этом случае на участке трубы на расстоянии примерно 10 м от ее начала прогнозируемая разрушающая нагрузка примерно в два раза превышает рабочую, в то время как участки 1 и 2 показывают, что разрушающая нагрузка

ка превышает рабочую примерно в четыре раза (цвет зоны 3 оранжевый).

Для повышения надежности в принятии решения о необходимости остановки и вывода из эксплуатации конструкций по данным контроля установлены коэффициенты запаса по прогнозируемой разрушающей нагрузке. При этом чем большая разница между прогнозируемой и рабочей нагрузкой, тем меньший коэффициент запаса устанавливает система. С уменьшением отношения $P_{\text{раб.}}/P_{\text{прог.}}$ коэффициент запаса автоматически увеличивается.

На рис. 6 представлена схема контролируемых ниток трубопровода с отмеченными местами повышенной АЭ активности. Зелеными квадратами указаны участки, в которых ранее предприятие проводило плановый неразрушающий контроль и дефекты обнаружены не были (темно-зеленый – 2013 г., светло-зеленый – 2009 г.). Желтыми и оранжевыми эллипсами разной интенсивности показаны участки повышенной акустической активности, для которых системой сгенерированы предупреждения 1 и 2 уровня в соответствии с таблицей.

Отметим, что в числе обнаруженных потенциально опасных участков есть такие, доступ к которым затруднен и проведение контроля другими методами требует серьезных затрат времени. Это еще раз подтверждает правильность выбора метода АЭ для непрерывного мониторинга трубопроводов промперегрева.

Дополнительная эффективность работы системы мониторинга достигается также наличием удаленного доступа посредством сети Интернет. Имеется накопленный положительный опыт [16] авторского надзора специалистами ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ по результатам непрерывного АЭ мониторинга, создания интегрирующих информационных систем, объединяющих результаты мониторинга разных объектов на одном экране и проводящих их совместный анализ.

Сегодня имеются все необходимые аппаратные, программные и организационные средства для оснащения оборудования энергетической отрасли системами непрерывного АЭ мониторинга, а их использование является [15] источником обеспечения безопасной эксплуатации и повышения рентабельности работы предприятий [21].

Выводы

Разработана и внедрена в опытную эксплуатацию система непрерывного АЭ мониторинга паропроводов горячего промперегрева пара энергоблока № 1 киевской ТЭЦ-6. Исследованы акустические свойства материала паропроводов. Проведены предварительные АЭ высокотемпературные исследования материала паропроводов.



Разработанная методика позволяет на основе данных АЭ в реальных условиях эксплуатации конструкций в любой момент времени и независимо от объема наработки и колебаний температуры определять разрушающую нагрузку материала конструкции. Прогнозируемая системой непрерывного АЭ мониторинга разрушающая нагрузка определяется с достаточной для практики точностью.

С целью обеспечения запаса по времени при принятии решения о состоянии контролируемого объекта, для прогнозируемой разрушающей нагрузки установлены коэффициенты запаса, определяемые системой мониторинга автоматически в зависимости от степени опасности развивающихся в материале деструктивных процессов.

Представлены схема контроля и особенности практического применения системы мониторинга. Примененная методика и технология позволяют определять координаты участков объекта контроля с минимальным значением разрушающей нагрузки. Удаленный доступ позволяет посредством сети Интернет выполнять авторский надзор за работой системы.

1. Березина Т. Г. Исследование закономерностей развития разрушения при ползучести теплоустойчивых сталей // Пробл. прочности. – 1985. – № 8. – С. 48–52.
2. Березина Т. Г., Бугай Н. В., Трунин И. И. Диагностирование и прогнозирование долговечности металла теплоэнергетических установок. – Киев: Техніка, 1991. – 120 с.
3. Исследование АЭ характеристик стали 12Х18Н10Т при температуре 560 °С. Сообщение 1. Методика и некоторые результаты / А. Я. Недосека, С. А. Недосека, А. А. Грузд и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2011. – № 1. – С. 13–19.
4. Исследование АЭ характеристик материалов при высоких температурах. Сообщение 1. Методика / Л. М. Лобанов, А. Я. Недосека, С. А. Недосека и др. // Там же. – 2009. – № 1. – С. 5–10.
5. Исследование АЭ характеристик материалов при высоких температурах. Сообщение 2 / Л. М. Лобанов, А. Я. Недосека, С. А. Недосека и др. // Там же. – 2009. – № 4. – С. 5–13.
6. Куманин В. И., Ковалева Л. А., Алексеев С. В. Долговечность металла в условиях ползучести. – М.: Металлургия, 1988. – 202 с.
7. Минц И. И., Березина Т. Г., Ходыкина Л. Е. Исследование тонкой структуры и процесса образования пор в стали 12Х1МФ при ползучести // Физ. металлов и металловедение. – 1974. – 37, вып. 4. – С. 823–876.
8. Тайра С., Отани Р. Теория высокотемпературной прочности материалов. – М.: Металлургия, 1986. – 279 с.
9. Модель накопления повреждений в металлических материалах при статическом растяжении / А. А. Лебедев, Н. Г. Чаусов, С. А. Недосека, И. О. Богинич // Пробл. прочности. – 1995. – № 7. – С. 31–40.
10. Недосека С. А. Объектный подход к решению задач механики сплошной среды и прогнозированию состояния материалов // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 1998. – № 1. – С. 13–21.
11. Недосека С. А. Прогноз разрушения по данным акустической эмиссии // Там же. – 2007. – № 2. – С. 3–9.
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. Мортон К. Смит. Основы физики металлов. – М.: Металлургиздат, 1962. – 456 с.
14. Акустическая эмиссия и ресурс конструкций: Теория, методы, технологии, средства, применение / Б. Е. Патон, Л. М. Лобанов, А. Я. Недосека и др. – Киев: Индпром, 2012. – 312 с.
15. Недосека А. Я., Недосека С. А., Яременко М. А. Непрерывный мониторинг магистральных газопроводов и газокompрессорных станций методом акустической эмиссии // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2011. – № 4. – С. 3–13.
16. Опыт ИЭС им. Е. О. Патона в области акустико-эмиссионного контроля / Б. Е. Патон, Л. М. Лобанов, А. Я. Недосека и др. // Там же. – 2012. – № 1. – С. 7–22.
17. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / Под ред. Б. Е. Патона. – Киев: Индпром, 2008. – 812 с.
18. Структура, повреждаемость и свойства гибов паропроводов после длительной эксплуатации / П. И. Минц, Т. Г. Березина, Л. Е. Ходыкина и др. // Теплоэнергетика. – 1981. – № 10. – С. 49–51.
19. Недосека С. А., Недосека А. Я., Овсиенко М. А. Влияние методов обработки акустико-эмиссионной информации на формирование АЭ событий и определение их координат // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2011. – № 2. – С. 5–14.
20. Недосека С. А., Овсиенко М. А. Особенности обработки данных акустической эмиссии для сложных и множественных локационных антенн // Там же. – 2012. – № 2. – С. 7–12.
21. ТУ 14-3-460: 2009/ТУ 27.2-05757883-207:2009. Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов.

The paper deals with the issues of application on the basis of acoustic emission method (AE) of continuous monitoring of hot reheat steam piping during operation with breaking load prediction. Capabilities of introduction of AE method for continuous monitoring of steam piping of a power unit of Kiev TPP have been analyzed. Acoustic properties of steam piping material have been studied. Preliminary high-temperature AE studies of steam piping material have been conducted. Mounting and testing of continuous AE monitoring system, its commissioning in test operation mode, and correction of settings based on obtained measurement results have been performed. It is shown that breaking load predicted by continuous AE monitoring system is determined with accuracy sufficient for practical purposes. Schematic of monitoring and features of practical application of the system are presented. 21 References, 1 Table, 6 Figures.

Key words: acoustic emission, continuous piping monitoring, breaking load prediction

Поступила в редакцию
04.06.2014



ТЕХНОЛОГИЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕМЕНТОВ И УЗЛОВ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННОЙ ШИРОГРАФИИ

Л. М. ЛОБАНОВ¹, В. А. ЗНОВА², В. А. ПИВТОРАК¹, И. В. КИЯНЕЦ¹

¹ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²ГП «АНТОНОВ». 03062, г. Киев, ул. Академика Туполева, 1. E-mail: info@antonov.com

Приведена технология неразрушающего контроля качества авиационных конструкций на основе использования метода электронной ширографии. Рассмотрено выявление дефектов в виде трещин путем сравнения двух спекл-структур исследуемой поверхности, полученных в исходном и нагруженном состояниях объекта. Представлены результаты, полученные как на методических образцах, так и на элементах натурных конструкций. Показано, что метод позволяет эффективно выявлять внутренние дефекты, вызывающие при нагружении (механическом, термическом и т. п.) локальную концентрацию напряжений. Библиогр. 5, рис. 6.

Ключевые слова: неразрушающий контроль качества, диагностика авиационных конструкций, ширография

В соответствии с современными Авиационными правилами, как действующими в СНГ (АП-25), так и в странах дальнего зарубежья (FAR-25, JAR-25), основным принципом обеспечения прочности конструкции гражданских самолетов является «допустимость повреждения». При этом предполагается, что возникшее в процессе эксплуатации или изготовления повреждение (дефект) будет своевременно выявлено и устранено до того, как состояние конструкции окажется ниже требуемой остаточной прочности. С этой целью еще на этапе проектирования и испытаний разрабатываются перечни мест конструкции, требующих контроля, в регламенте технического обслуживания определяются сроки, методы и средства неразрушающего контроля. При этом учитывается напряженно-деформированное состояние, свойства материалов и предполагаемые методы контроля.

В процессе эксплуатации уточняется нагруженность конструкции, в случае необходимости корректируются перечень мест и применяемые методы контроля.

Использование принципа «допустимости повреждения» приобрело особое значение для обеспечения прочности парка стареющих самолетов. Его применение позволило увеличить ресурсы ранее спроектированных самолетов при сохранении заданного уровня безопасности.

В этой связи возрастают требования к методам неразрушающего контроля: с одной стороны, необходимо повышение надежности и чувствительности методик обнаружения дефектов, что позволит реже проводить контроль, с другой – требуется уменьшение трудоемкости проведения контроля и вспомогательных работ.

В настоящее время разработаны и широко используются различные методы неразрушающего контроля качества конструкций. К ним относятся акустические, радиационные, магнитные, визуально-оптические и др. [1, 2]. Каждый имеет преимущества и недостатки, свою область применения, которая определяется чувствительностью и точностью обнаружения дефектов, но ни один из них не является универсальным. Передовые научно-исследовательские центры в различных странах ведут разработку и внедрение новых методов контроля качества различных объектов. Большие перспективы имеют комплексные методы контроля, сочетающие несколько способов. Новые возможности для диагностики конструкций заключены в использовании методов лазерной интерферометрии, в частности, электронной ширографии (ЭШ) [2, 3].

В последние годы ЭШ является наиболее интенсивно развивающимся когерентным оптическим методом исследования конструкций, который осуществляется с помощью простых оптических устройств и дает возможность бесконтактно исследовать поверхность объекта, не повреждая ее. Этот метод используется при исследовании различных материалов и конструкций и позволяет измерить деформацию объекта в условиях его нагружения. Этим обусловлена нечувствительность ЭШ к жестким смещениям объекта, вызванным влиянием окружающей среды, что и определяет ее универсальность и эффективность применения в производстве [2–5].

Важным преимуществом ЭШ для НК качества объектов является то, что в отличие от традиционных методов, которые только фиксируют наличие



или отсутствие дефектов, она позволяет выявлять концентрацию деформаций и напряжений, вызванную присутствием дефекта и конструктивными особенностями объекта.

Суть метода ЭШ заключается в следующем. Контролируемый объект частично или полностью освещается с помощью лазера когерентной световой волной, которая при отражении от его поверхности попадает на сдвиговой элемент, размещенный перед объективом CCD-камеры, разделяя апертуру на две половины. При этом в плоскости изображения CCD-камеры формируется два смещенных изображения контролируемого объекта. Интерференция световых волн образует интерференционную спекл-структуру, которая с помощью CCD-камеры вводится в компьютер. Полученные микроинтерференционные спекл-структуры, записанные для двух состояний объекта (до и после нагружения), сравниваются и обрабатываются с целью получения макроинтерференционной картины полос (широграммы), которая содержит информацию о производных от компонент вектора перемещений точек поверхности. Компьютерная программа позволяет в автоматизированном режиме построить вдоль выбранных сечений контролируемой поверхности объекта кривые распределения производных от компонент вектора перемещений точек. На основе анализа полученных данных можно сделать вывод о дефектности исследуемой поверхности. Концентрация напряжений и деформаций в зоне дефектов под действием нагрузки проявляется в виде локальной особенности на картине интерференционных полос или на графике распределения производной от компоненты вектора перемещений в характерном сечении.

При выполнении неразрушающего контроля качества конструкций используется компактная широкографическая установка, в комплект которой входят полупроводниковый лазер, CCD-камера, широмодуль и портативный компьютер. Исследования осуществляются бесконтактно по отношению к поверхности объекта, изготовленного из металлических, полимерных и композиционных материалов [4].

Разработанная технология позволяет эффективно осуществлять широкографический неразрушающий контроль качества натуральных элементов и узлов конструкций сложной геометрической формы и значительных размеров [3–5]. Применение этого метода перспективно также для контроля качества элементов и узлов авиационных конструкций.

Исследовали тестовые образцы подкрепляющих элементов обшивки фюзеляжа и крыла самолета. Образцы представляли собой две металлические пластины размерами $200 \times 35 \times 5$ мм, которые скреплялись между собой одним или пятью болтовыми соединениями. В одной части образцов отверстия под болты выполняли с их раззенковкой. Для имитации трещин в образцах с цилиндрическими и раззенкованными отверстиями были выполнены надрезы длиной 3 мм и шириной раскрытия не более 0,1–0,2 мм.

При выполнении исследований вначале проводили эксперименты на тестовых образцах с одним центральным раззенкованным отверстием под болтовое соединение с имитированной трещиной (рис. 1). В качестве нагружения применяли обдув исследуемой поверхности образца воздухом, нагретым до $T = 200^\circ\text{C}$ в течение 50 с. Запись ши-

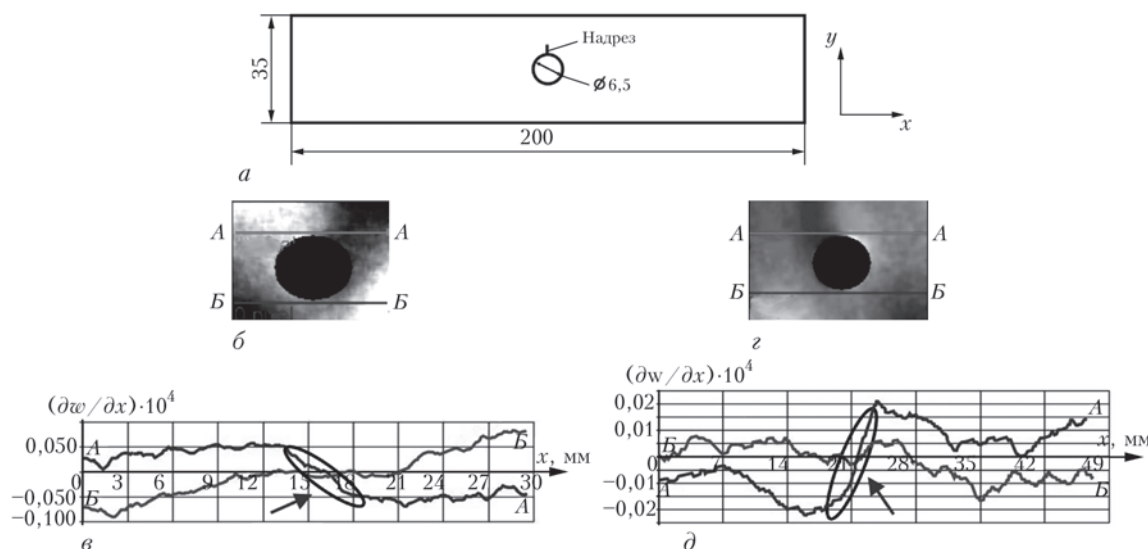


Рис. 1. Ширографический контроль тестового образца (а) с одним болтовым раззенкованным соединением и дефектом возле отверстия, выявляемым при термическом нагружении на стадии охлаждения (б, в) и при комбинированном нагружении на стадии нагрева (з, д): а – схема образца ($200 \times 35 \times 5$ мм); б, з – поверхность деформирования исследуемого участка с обозначенными выбранными сечениями А–А и Б–Б; в, д – кривые распределения производной $\partial w / \partial x$ вдоль выбранных сечений А–А и Б–Б (зона дефекта показана стрелкой)



рограм выполняли с двукратным увеличением как на стадии нагрева, так и на стадии охлаждения. При этом величина широдвига составляла 5 мм вдоль направления оси OX . Типичные результаты, полученные при термическом нагружении и характеризующие наличие дефекта в зоне болтового соединения приведены на рис. 1, б, в. Локальные изменения величины и знака производной характеризуют наличие дефектной зоны (отмечено стрелкой).

С целью выбора оптимального способа нагружения таких образцов (рис. 1, а), выполняли эксперименты с использованием комбинированного нагружения: предварительного механического подгружения образцов изгибом из плоскости образца и обдувом воздухом, подогретым до $\sim 200^\circ\text{C}$ в течение ~ 20 с. Величина широдвига составляла 5 мм в направлении оси OX . Фазовая картина и кривая распределения производной $\partial w/\partial x$ вдоль выбранных сечений показаны на рис. 1, г, д. Резкие скачки в распределении производной свидетельствуют о дефектности контролируемого участка поверхности исследуемого образца (отмечено стрелкой).

Анализ результатов, представленных на рис. 1, показывает, что комбинированное нагружение вызывает более резкий локальный скачок в распределении производной и поэтому такой способ нагружения при контроле качества болтовых соединений является оптимальным.

Были выполнены исследования и эксперименты по выявлению имитированной трещины в окрестности цилиндрического отверстия болтового соединения, при этом головка болта выступает над лицевой поверхностью тестового образца. Для нагружения контролируемых тестовых образцов применяли механическое воздействие (изгиб) и обдув воздухом, нагретым до $\sim 200^\circ\text{C}$ в течение 8 с. При выполнении эксперимента величина широдвига составляла 1 мм вдоль направления оси OX . Полученные результаты, характеризующие деформирование тестового образца вдоль выбранных сечений, приведены на рис. 2. Резкий локальный скачок в распределении производной $\partial w/\partial x$ вдоль выбранных сечений характеризует наличие дефектного участка (отмечено стрелкой). Другие пики на кривых распределения производной $\partial w/\partial x$ связаны с шероховатостью контролируемой поверхности тестового образца.

Выполняли также эксперименты по выявлению имитированной трещины в окрестности отверстия, расположенной под головкой болта, который находится в массиве других болтовых соединений. Проводили экспериментальные исследования на тестовых образцах с пятью болтовыми соединениями и нанесенным надрезом (имитация трещины) под головкой центрального болта

(рис. 3). Для нагружения исследуемого тестового образца применяли термический способ, так как использование механического нагружения (изгиб) при наличии пяти болтовых соединений является неэффективным. Регистрацию широграмм контролируемого участка выполняли как на стадии его нагрева, так и на стадии охлаждения, величина широдвига составляла 5 мм вдоль направления оси OX .

Результаты эксперимента, полученные на стадии нагрева поверхности образца обдувом воздухом с температурой $\sim 150^\circ\text{C}$ в течение 15 с, показаны на рис. 3, б, в. Локальное изменение величины и знака производной $\partial w/\partial x$ вдоль указанных исследуемых сечений $A-A$ и $B-B$ характеризует наличие дефектов в контролируемом участке поверхности тестового образца.

Разработанную технологию применяли для НК качества натурных элементов обшивки фюзеляжа самолета с использованием ЭШ и термического нагружения. Исследуемый элемент обшивки раз-

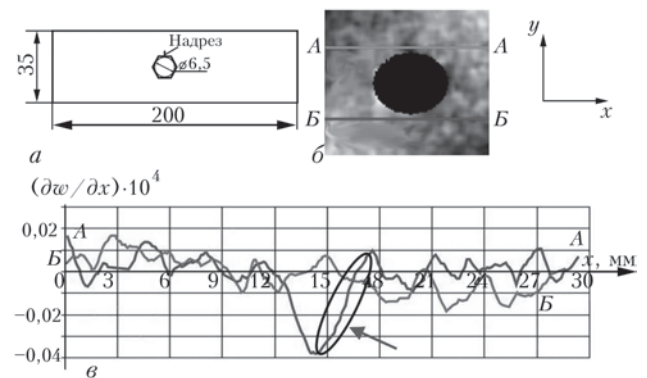


Рис. 2. Ширографический контроль тестового образца с одним болтовым соединением и дефектом возле отверстия, выявляемым при комбинированном нагружении на стадии охлаждения: а – схема образца (200×35×5 мм); б – поверхность деформирования исследуемого участка с обозначенными выбранными сечениями $A-A$ и $B-B$; в – кривые распределения производной $\partial w/\partial x$ вдоль выбранных сечений $A-A$ и $B-B$ (зона дефекта показана стрелкой)

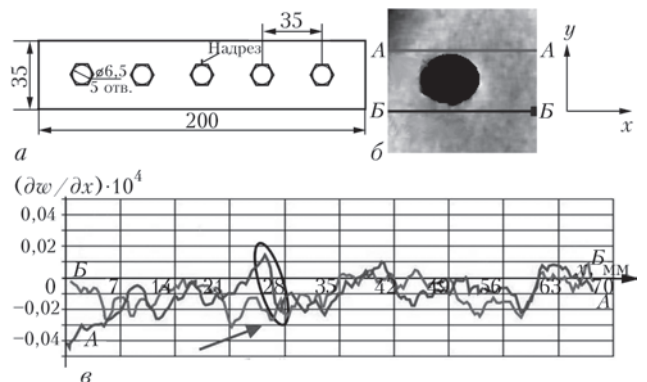


Рис. 3. Ширографический контроль тестового образца с пятью болтовыми соединениями и нанесенным надрезом под головкой центрального болта, выявляемым при термическом нагружении на стадии нагрева (описание а–в такие же, как на рис. 2)



мерами 1220×980×2 мм из алюминиевого сплава, усиленный с обратной стороны рядами стрингеров, которые с помощью заклепок соединялись с обшивкой, показан на рис. 4, а.

Имитированные трещины, которые необходимо выявить при проведении контроля качества, располагались в окрестности отверстий от заклепок и на полке стрингеров.

Выполнялась первая серия экспериментов, целью которой являлось выявление имитированной трещины в окрестности отверстия от заклепки (заклепка отсутствовала). В качестве нагружения применялся обдув лицевой стороны элемента обшивки воздухом, нагретым до ~ 100 °С в течение ~ 10 с. Запись в компьютер спекл-структуры исследуемого участка поверхности обшивки выполнялась с двукратным оптическим увеличением. Типичные результаты, а именно – деформирование из плоскости в окрестности исследуемых от-

верстий, которые характеризуют наличие имитированной трещины, расположенной в окрестности отверстия, приведены на рис. 4, б, в. Локальное изменение величины производной в окрестности одного из отверстий характеризует присутствие дефектного участка.

Вторая серия выполненных экспериментов направлена на выявление имитированной трещины в окрестности отверстия под заклепкой, которая находится в массиве других точек. Типичные результаты, полученные при обдуве контролируемого участка поверхности обшивки воздухом, нагретым до ~ 100 °С в течение ~ 5 с на стадии охлаждения, показаны на рис. 5. Картина поверхности деформирования исследуемого участка, а также кривая распределения производной $\partial w/\partial x$ вдоль контролируемого сечения А–А, отображают две головки заклепок на лицевой поверхности элемента обшивки фюзеляжа самолета и деформирование из плоскости исследуемой поверхности в окрестности двух отверстий под заклепками.

С целью выявления имитированной трещины, которая располагается на полке стрингера, проводили эксперименты с использованием термического способа нагружения (нагрев воздухом до ~ 100 °С в течение ~ 5...10 с) контролируемого участка поверхности обшивки. При этом масштаб изображения изменялся таким образом, чтобы на исследуемом участке контролируемой поверхности разместилось два ряда по 5 заклепок в каждом (30 мм на исследуемом участке изображались как 25 мм на экране компьютера). Типичная картина поверхности деформирования исследуемого участка, а также кривая распределения производной $\partial w/\partial x$ вдоль исследуемых сечений А–А и Б–Б

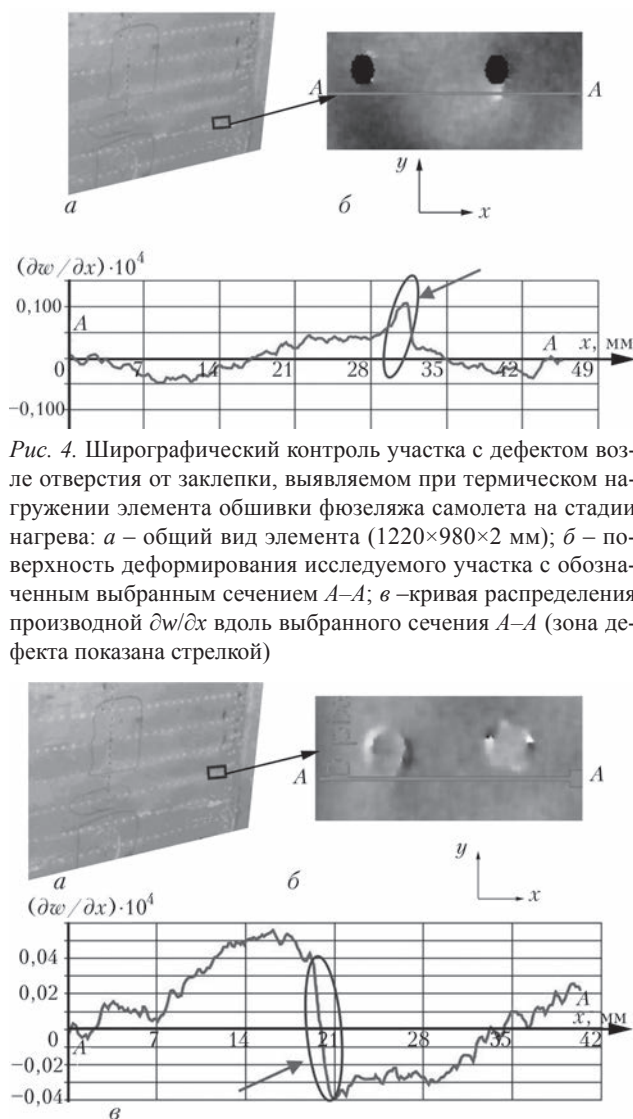


Рис. 4. Ширографический контроль участка с дефектом возле отверстия от заклепки, выявляемом при термическом нагружении элемента обшивки фюзеляжа самолета на стадии нагрева: а – общий вид элемента (1220×980×2 мм); б – поверхность деформирования исследуемого участка с обозначенным выбранным сечением А–А; в – кривая распределения производной $\partial w/\partial x$ вдоль выбранного сечения А–А (зона дефекта показана стрелкой)

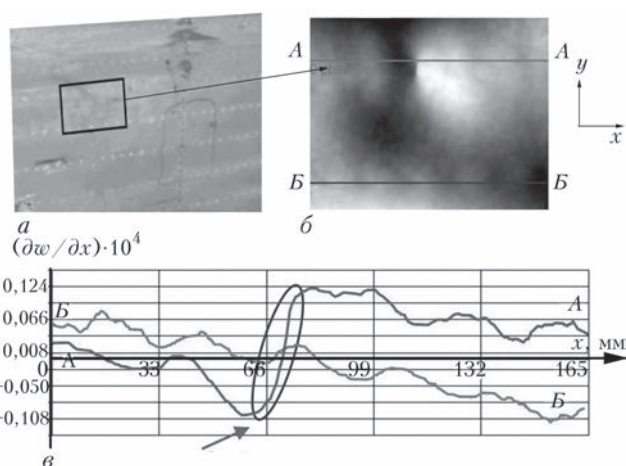


Рис. 6. Ширографический контроль участка поврежденного стрингера при термическом нагружении элемента обшивки фюзеляжа самолета на стадии охлаждения: а – общий вид элемента (1220×980×2 мм); б – поверхность деформирования исследуемого участка с обозначенными выбранными сечениями А–А и Б–Б (дефектное и бездефектное соответственно); в – кривые распределения производной $\partial w/\partial x$ вдоль выбранных сечений А–А и Б–Б (зона дефекта показана стрелкой)

Рис. 5. Ширографический контроль участка с дефектом возле отверстия с заклепкой при термическом нагружении элемента обшивки фюзеляжа самолета на стадии охлаждения (описание а–в такие же, как на рис. 4)



показаны на рис. 6. Локальное изменение величины и знака производной в окрестности одной из заклепок характеризует дефектный участок (отмечено стрелкой).

Выводы

Разработана технология широкографического неразрушающего контроля качества, которая при использовании оптимального способа нагружения (механического, температурного и т. п.) с учетом особенностей геометрии элементов авиационных конструкций и материалов контроля позволяет эффективно выявлять внутренние дефекты, вызывающие при нагружении концентрацию напряжений.

Полученные результаты контроля длительное время могут сохраняться в памяти компьютера и при необходимости после эксплуатации объекта

контроля на протяжении определенного времени может быть проведена повторная диагностика конструкций с целью выявления дефектов, возникших в процессе эксплуатации.

1. *Rastorgy P. K.* Trends in nondestructive and inspection / Amsterdam-Lausanne: Elsevier, 2000. – 633 p.
2. *Hung Y. Y., Ho H. P.* Shearography: An optical measurement technique and applications // Materials Sci. and Eng. – 2005. –R49. – P. 61–87.
3. *Диагностика элементов и узлов конструкций с применением метода электронной широкографии* / Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, Е. М. Олейник, И. В. Киянец // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2008. – № 4. – С. 7–13.
4. *Оперативний контроль якості елементів авіаційних конструкцій методом електронної широкографії* / Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, В. Я. Дереча та ін. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2009. – 45, №3. – С. 37–42.
5. *Оперативный контроль качества сварных панелей из сплава ВТ-20 с использованием метода электронной широкографии* / Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, Е. М. Савицкая и др. // Автомат. сварка. – 2011. – № 11. – С. 28–33.

Поступила в редакцию
08.07.2014

ДНИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ В БОЛГАРИИ

С 9 по 18 июня 2014 г. в древнем болгарском черноморском городе Созополь прошли Дни неразрушающего контроля – комплекс мероприятий по неразрушающему контролю, который включал: 29-ю Международную конференцию «Дефектоскопия», научный семинар по Европейскому проекту «INNOPIPES» и совещание представителей организаций, участвующих в проекте, болгарско-русский семинар «Диагностика электроэнергетических систем», национальный семинар «Задачи и проблемы НК элементов железнодорожного транспорта», круглые столы «Порошковая металлургия и композитные материалы», «Стандартизация, нормативная база и обучение по НК», «Аккредитация», «Неразрушающий контроль в Болгарии».

Ключевым мероприятием «Дней...» является традиционная конференция «Дефектоскопия», которая в этом году собрала вместе около 180 специалистов из Болгарии, Украины, России, Румынии, Польши, Германии, Италии, Латвии, Литвы, Хорватии, Боснии и Герцеговины, которые представили 125 пленарных, секционных и стендовых докладов.

Приятно отметить большое представительство Украины на конференции: 13 специалистов из Института электросварки им.Е.О.Патона НАН Украины, НТТУ «Киевский политехнический институт», НТУ «Харьковский политехнический институт», Ивано-Франковского НТУ нефти и газа.

В выставке средств неразрушающего контроля участвовали компании Innovia, Namikon 2001, TROKUTTEST-Bulgaria, E-VIT, Omel NDT, Spectri, ET «Ст. Запryanov», Мултитест.

Открыл конференцию президент Болгарского общества по НК, член Международной академии по НК (ANDTI) профессор Митко Миховски. Далее с приветственным словом от имени национальных обществ по НК к участникам конференции обратились президент Российского общества НКТД, академик РАН, член ANDTI проф. Э. С. Горкунов, ученый секретарь Украинского общества НКТД А. Л. Шекеро.

Благодаря широкой известности и популярности болгарской конференции по НК, именно ее выбрали для проведения семинара и ежегодного рабочего совещания участники Европейского научного проекта «INNOPIPES», посвященного развитию современной технологии дальнего действия ультразвукового контроля для обнаружения коррозионных повреждений трубопроводов и разработке новых композиционных материалов для их ремонта. Выполнение проекта предусмотрено в рамках Седьмой рамочной программы Европейского союза и предполагает взаимный обмен специалистами для их стажировки, а также обмена знаниями и опытом в области исследований.

В проекте участвуют восемь организаций из семи стран: Латвии (Рижский технический университет), Болгарии (Институт механики Болгарской академии наук), Польши (Военная техническая академия), Румынии (Институт нефти и газа), Украины (Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины и НТУ «Харьковский политехнический институт»), России (Южный федеральный университет) и Республики Беларусь (Институт металлополимеров Академии наук Беларуси).

Специалисты этих организаций в ходе своих презентаций поделились с участниками конференции достигнутыми в ходе совместных исследований по теме проекта результатами и обсудили направления дальнейших работ.

А. Л. Шекеро, ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины



НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В. А. ТРОИЦКИЙ, М. Н. КАРМАНОВ, Н. В. ТРОИЦКАЯ

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Композиционные материалы (КМ) находят широкое применение во многих отраслях промышленности, особенно в авиакосмической, поскольку при минимальной массе конструкции и изделия из КМ имеют высокую прочность, не подвержены коррозии, более долговечны. Обеспечение высокого качества и надежности изделий из КМ невозможно без применения эффективных современных методов неразрушающего контроля (НК). Рассматриваются особенности применения известных методов НК применительно к КМ. Библиогр. 17, табл. 1, рис. 6.

Ключевые слова: композиционные материалы, дефекты, неразрушающий контроль, радиационный контроль, ультразвуковой контроль, томография, термография

Композиционные материалы – это многокомпонентные материалы [1], состоящие из полимерной, металлической, углеродной, керамической или др. основы (матрицы), армированной наполнителями из волокон, нитевидных кристаллов, тонкодисперсных частиц и др. По структуре наполнителя КМ подразделяют на волокнистые (армированы волокнами и нитевидными кристаллами), слоистые (армированы пленками, пластинками, слоистыми наполнителями), дисперсноармированные или дисперсноупрочненные (с наполнителем в виде тонкодисперсных частиц). Матрица в КМ обеспечивает монолитность материала, передачу и распределение напряжения в наполнителе, определяет тепло-, влаго-, огне- и химическую стойкость. По природе матричного материала различают полимерные, металлические, углеродные, керамические и др. композиты. Путем подбора состава и свойств наполнителя и матрицы (связующего), их соотношения, ориентации наполнителя можно получить материалы с требуемым сочетанием эксплуатационных и технологических свойств, таких как прочность, жесткость, уровень рабочих температур. Многие композиты превосходят традиционные материалы и сплавы по своим механическим свойствам, по усталостной прочности, термостойкости, виброустойчивости, шумопоглощению, ударной вязкости и другим свойствам и в то же время они легче. Созданы композиты с ударной прочностью и ударным модулем упругости в 2...5 раза большими, чем у обычных конструкционных сплавов [1, 2].

Композиционные материалы широко применяются в авиации, ракето-, автомобиле-, машиностроении, металлургии, в химической и нефтехимической промышленности, медицине, ядерной энергетике, для изготовления спортивного снаряжения [3]. Так,

почти весь фюзеляж Boeing 787 изготовлен из КМ [4]. В настоящее время технологии производства элементов и изделий из КМ развиваются опережающими темпами практически во всех промышленно развитых странах.

Особенность КМ состоит в том, что они не являются монолитным материалом в классическом смысле слова, как, например, металлы. КМ – это фактически конструкция, создаваемая в процессе изготовления изделия. Стоит проблема объективной оценки качества КМ, возможности применения различных физических методов для контроля их качества.

Все дефекты КМ разделены на два больших класса: производственные дефекты, которые появляются в конструкциях либо в процессе их изготовления, либо в процессе изготовления составляющих материалов компонента, и эксплуатационные повреждения, возникающие в процессе эксплуатации. Дефекты могут быть разделены на три группы: микро-, мини- и макродефекты [3].

Микродефекты – это дефекты армирующих волокон (микротрещины, микровключения, микропустоты, отклонения от формы, изломы и др.), дефекты матрицы в промежутках между элементарными волокнами (микропоры, микротрещины, микровключения и др.), дефекты на поверхности раздела волокно–матрица и др.

Минидефекты – это крутка, искривления, разориентация волокон, мелкие риски, царапины, вмятины, обрыв отдельных нитей, жгутов или групп элементарных волокон.

Макродефекты – это трещины, пересекающие слои вглубь (надрезы), раковины, вмятины на поверхности КМ, дефекты ударного характера, растрескивание, расслоения, выпучивания, непрочности, воздушные макровключения и др.



В процессе полимеризации композитов при их изготовлении из-за внутренних напряжений, неравномерного распределения связующего и других технологических факторов могут возникать расслоения, отслоения отдельных слоев, рыхлость, трещины и др. Также возможны обрывы нитей, жгутов арматуры и т. п. (рис. 1). Основные типы дефектов, причины возникновения и их влияние на механические характеристики изделий из композитов достаточно подробно изложены в работах [3, 5]. Характерные виды эксплуатационных дефектов, выявляемые при визуальном контроле, показаны на рис. 2 [6].

В отличие от металлических, дефекты КМ в процессе эксплуатации могут быстро увеличиваться, что приводит к снижению надежности конструкции. Через поверхностную трещину матрицы влага проникает внутрь композита и разрушает его, снижает его модуль упругости. Частый дефект в виде расслоения приводит к снижению прочности на сжатие, обрыву волокон, уменьшает усилие на разрыв [7].

КМ – весьма сложные объекты для контроля, так как характеризуются существенной неоднородностью структуры, анизотропией свойств, большим разнообразием типов армирования (однонаправленный, продольно-поперечный, комбинированный и др.), специфическими физическими свойствами: высокими электроизоляционными качествами, низкой теплопроводностью, звукоизоляцией, большим разбросом физико-механических характеристик, малыми значениями плотности ($0,02 \dots 2,0 \text{ г/см}^3$). Для композитов у одних и тех же физических методов дефектоскопии отношение сигнал/шум меньше, чем для однород-

ных структур (металлов). Поэтому для одних и тех же методов НК чувствительность и разрешающая способность применительно к композитам существенно ниже, чем для металлов [3, 7]. С подобной проблемой сталкиваются при УЗ контроле крупнозернистых структур, таких как чугун и некоторые виды нержавеющей стали.

Большинство видов КМ в зависимости от используемого вида наполнителя относятся к диэлектрикам или плохим проводникам. Практически все КМ являются немагнитными материалами, поэтому многие методы НК, используемые при НК металлов, не подходят для контроля изделий из КМ.

Неэффективны для контроля композитов также высокочастотные УЗ методы, так как УЗ волны с частотой выше $1 \dots 5 \text{ МГц}$ сильно ослабляются и рассеиваются матрицей, волокнами, различными включениями. Это существенно ограничивает диапазон контролируемых толщин КМ [3, 7]. Некоторые виды КМ могут впитывать влагу. В этом случае неприменимы методы НК, которые предполагают смачивание поверхности контролируемых объектов.

Основные методы, которые применяются при НК изделий из КМ, представлены в таблице.

Опишем особенности применения основных методов НК применительно к КМ.

При бесконтактном УЗ контроле для возбуждения волн часто используют мощные лазеры. Эта технология требует определенных мер безопасности при работе персонала и имеет ограниченное применение в полевых условиях.

Среди акустических методов НК, особенно многослойных клееных конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ), особое место занимают низкочастотные методы, в которых применяется сухой контакт преобразователя с поверхностью контролируемого изделия [8]. Основная область применения этих низкочастотных методов – обнаружение зон нарушения соединений в многослойных клееных конструкциях из ПКМ на основе углеродных, борных, стеклянных, органических волокон (угле-, боро-, стекло-, органопластиков и т. п.). Этими методами УЗК могут быть выявлены дефекты в неметаллических покрытиях зоны нарушения клеевого соединения между покрытием и каркасом объекта.

Основными преимуществами специальных низкочастотных методов контроля перед другими методами НК многослойных клееных конструкций из ПКМ являются:

- отсутствие необходимости смачивания конструкций или погружения их в жидкость, что позволяет проводить контроль деталей и агрегатов из гигроскопичных материалов;

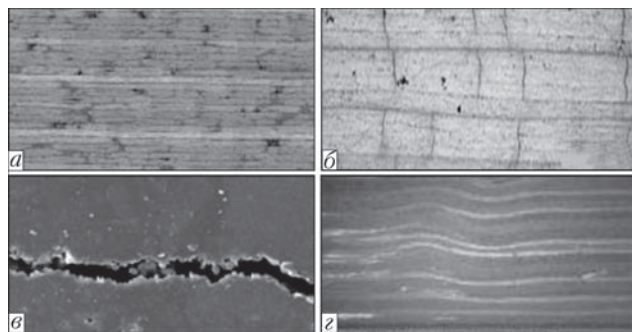


Рис. 1. Дефекты КМ: а – поры (темные); б – трещины; в – расслоение; г – волнистость

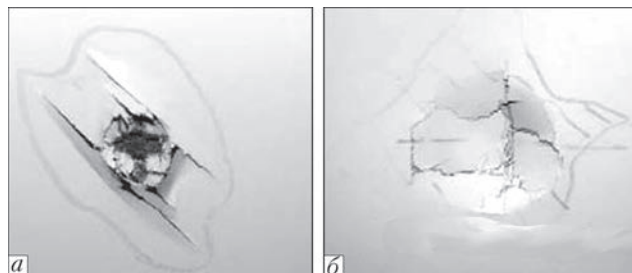


Рис. 2. Примеры внешних повреждений КМ: повреждения поверхности крыла (а) и фюзеляжа (б)



Методы НК контроля изделий из КМ

Область применения	Методы контроля КМ	Информационный параметр	Производительность контроля, м ² /ч (ориентировочно)	Размеры выявляемых дефектов, мм	
				минимальное раскрытие	минимальная протяженность
Нарушение сплошности	Активный тепловой контроль	Температура, тепловое поле	0,6	0,15	10
Трещина (раскрытый дефект)	УЗ контроль поверхностными волнами	Время прохождения УЗ сигнала между приемным и передающим УЗ преобразователями	2,1	0,1	15
Нераскрытые трещины (несплавление)	Метод УЗ термографии	Акустическое излучение + температурное поле	0,6	0,001	5...7
Различные дефекты и трещины	Радиография Радиоскопия Радиометрия	Интенсивность рентгеновского излучения, преобразованного в оптическое	4...5	0,15	3
Трещины	Радиоволновой	Характеристики излучения	0,5	0,1	15
Инородные включения, несплошности	Рентгенотелевизионный	Сравнение рентгеновского и видеоизображений	7	0,2	0,2
Несплошности многослойных конструкций типа тел вращения	Тангенциальное просвечивание	Изменение размеров и глубины расположения	3	0,2	10

– кривизна поверхности контролируемых конструкций обычно не является препятствием для проведения контроля, причем возможен контроль как выпуклых, так и вогнутых деталей;

– возможность контроля деталей, выполненных из анизотропных материалов с различной шероховатостью поверхности.

У негигроскопичных КМ акустический контакт между датчиком и объектом осуществляется через связывающие жидкости. Для больших корпусов УЗ колебания могут передаваться по струе воды.

Очень часто для контроля КМ используется метод свободных колебаний, который основан на анализе характеристик свободных колебаний изделия, вибрирующего после удара [7]. Простейший случай практического применения этого метода – контроль на слух целостности стеклянной или фарфоровой посуды. Этот метод с соответствующей электронной аппаратурой широко используется для определения расслоений и воздушных полостей, непрочности, расслоений, характеризующихся наличием заполненного газом промежутка. Зоны с нарушением сцепления слоев, не имеющие заполненного газом промежутка, низкочастотными акустическими методами не выявляются [9].

Преимущества метода свободных колебаний перед другими низкочастотными акустическими методами НК (импедансным, велосиметрическим, акустико-топографическим и др.) заключаются в возможности [9, 10]:

- обнаружения дефекта на больших глубинах;
- контроля конструкций из материалов с малыми модулями упругости;

– контроля конструкций из материалов с высокими коэффициентами затухания упругих колебаний.

Один из наиболее распространенных и понятных для изготовителей и эксплуатационников ответственных изделий является радиационный контроль [11]. Этот метод может широко применяться при контроле КМ. Радиационные методы контроля композитов особенно эффективны для выявления различных пустот, для выявления посторонних материалов различных включений, для структурных неоднородностей, таких как пропуски, обрывы армирующих элементов.

Однако также как и в случае металлов, дефекты, которые не приводят к значительным изменениям общей толщины КМ в направлении просвечивания (трещины, расслоения, ориентированные перпендикулярно пучка излучению) не могут быть обнаружены при рентгеновском контроле.

Для этих материалов может использоваться капиллярно-радиационный метод [3], при котором контрастность элементов просвечиваемого объекта повышается введением жидкого рентгеноконтрастного пенетранта. Для этих целей выпускается достаточно широкий спектр органических и неорганических пенетрантов с высоким коэффициентом поглощения рентгеновского излучения. Наиболее широко используемым из них является йодид цинка, который имеет высокую радиационную непрозрачность по сравнению с другими веществами [7]. Рентгеноконтрастный пенетрант наносится на поверхность контролируемого объекта, выдерживается 30 мин и затем удаляется с поверхности абсорбиру-



ющей тканью. В этом случае рентгеновское излучение, проходящее через несплошность, заполненную таким пенетрантом, достаточно сильно поглощается, что позволяет обнаруживать повреждения, которые невозможно выявить обычным просвечиванием. Естественно, применение этого метода предполагает наличие поверхностных или сквозных повреждений, обеспечивающих капиллярными силами доступ пенетранта в полости расслоений или трещин.

В радиационной дефектоскопии высшим достижением последних лет является отказ от промежуточных носителей информации (пленок, многоразовых гибких пластин «ФОСФОМАТИК» и т. п.) и использование цифрового рентгенотелевизионного контроля [11, 12]. Здесь с помощью рентгенооптических преобразователей прошедшее через объект рентгеновское излучение преобразуется в оптическое, которое методами телевидения выводится на экран ТВ монитора. Для этого используются сравнительно недорогие рентгенооптические сцинтилляционные кристаллы, оптическое изображение с которых считывается с помощью высокочувствительных малогабаритных ПЗС камер. Рентгеновские ПЗС матрицы [12, 13] широко используются в флэш-радиографии (рис. 3). Линейные размеры анализируемого изображения – до 40 мм. Дискретный формат матрицы составляет 1300×1700 пикселей. Для преобразования аналогового сигнала в цифровой здесь используется 12...14 разрядный ЦАП. Такие матрицы отличаются высокой разрешающей способностью (20...28 пар линий/мм), что в два раза выше, чем для рентгеновской пленки и в 3...4 раза выше, чем для сцинтилляционных рентгенооптических преобразователей. Выпускаются также матрицы разных размеров: от миниатюрных для стоматологии и очень больших размеров для промышленного НК.

Цифровая радиоскопия с подключением компьютера (ноутбука) обеспечивает мгновенное получение цифрового рентгеновского изображения, улучшение визуального восприятия изобра-

жений, измерение геометрических параметров контролируемых объектов по их изображениям. Встроенная база данных обеспечивает ввод, хранение, выбор и отображение изображения, вывод результатов контроля, обеспечивает защищенный доступ, а также передачу данных по локальным и внешним сетям (интернет). Этот комплекс возможностей на основе рентгенотелевизионного контроля называется флэш-радиографией [12].

Возможности применения цифровой радиоскопии для анализа качества композитов показаны в работе [14]. На исходном цифровом рентгеновском изображении волокна корда имеют низкую контрастность, ширина волокон составляет всего несколько пикселей (рис. 4, а). В этом случае достаточно сложно исследовать структуру волокон. Предлагается набор специализированных цифровых фильтров обработки изображений, обеспечивающих существенное улучшение рентгеновских изображений волокон (рис. 4, б). Предусмотрена возможность выделения изображений кордов, ориентированных в заданном направлении (рис. 4, в, г).

Если позволяет геометрия объекта, то очень эффективно использование компьютерной томографии, которая применяется практически для любых материалов и объектов. Эта достаточно дорогостоящая технология предоставляет уникальные возможности для объемных исследований внутренней структуры. Ее развитием стала компьютерная микротомография, обеспечивающая разрешающую способность до нескольких мкм. Это позволяет выявлять отдельные углеродные волокна и их обрывы в углепластиках [15]. Пример выявления обрыва кордов показан на рис. 5.

Практическое применение томографии для диагностики композитов усложняется большими габаритами контролируемых изделий, для которых необходимо получить 360...720 снимков при круговом



Рис. 3. Флэш-радиография с рентгеновской ПЗС матрицей фирмы «Hamamatsu Photonics»: а – ПЗС сенсор; б – рентгеновское изображение композитного тройника на экране ноутбука

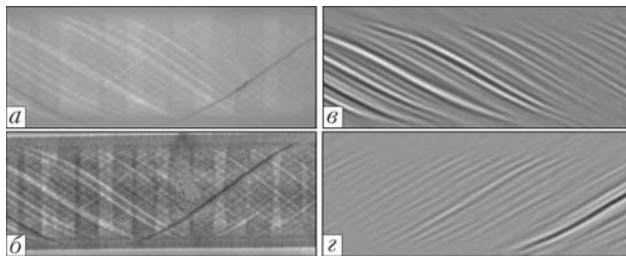


Рис. 4. Рентгеновское изображение образца КМ: а – исходное; б – после цифрового контрастирования; в, г – выделение изображений волокон корда, ориентированных в заданном направлении

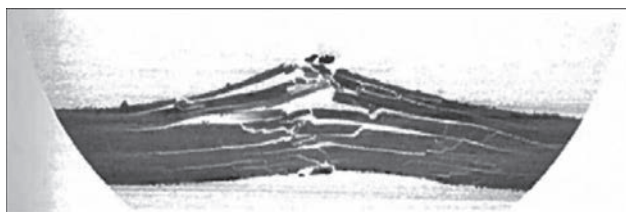


Рис. 5. Обрыв корда внутри композита на томограмме

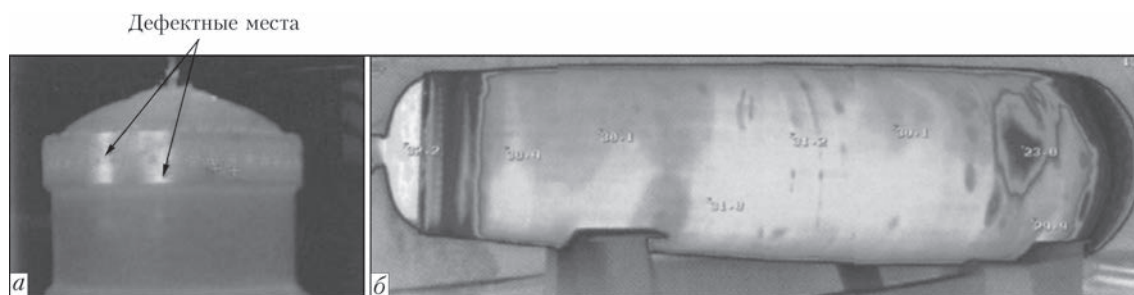


Рис. 6. Термограмма изделия с дефектами типа нарушения герметичности (а) и нарушение сплошности (б)

их вращения на 360° . В случае, когда имеется возможность получить только 6, 12, 24 проекции, то реализуется малоракурсная томография, когда недостающие экспозиции получают виртуально. Но в этом случае погрешность реконструкции геометрических параметров резко возрастает [16].

Термография – это одна из перспективных направлений НК конструкций из КМ [5, 7, 17]. В основу этого метода положен анализ признаков наличия дефектов по изменениям температурных полей с использованием инфракрасной техники (тепловизор или пирометр). Термография фиксирует изменения температуры на уровне $0,01^\circ\text{C}$. Поэтому даже при механическом нагружении фиксируются места концентрации энергии, где может происходить пластическая деформация с выделением тепла. Зафиксировав температурное поле на поверхности, можно определить местоположение концентратора энергии относительно поверхности изделия. Решив обратную задачу нестационарной теплопроводности, можно определить местоположение и размер дефекта [5].

На рис. 6 [5] показаны примеры распределения тепловых полей (термограммы) объектов из КМ.

Выводы

Для КМ исследование их качества физическими методами НК намного важнее, чем для металлических конструкций. НК композиционных материалов ввиду их специфических свойств требует особого подхода при использовании традиционных методов НК. Наиболее эффективна для этих целей флэш-радиография.

1. *Электронный справочник. Химическая энциклопедия.* Web: <http://www.chemport.ru>
2. *Союз производителей композитов.* Web: <http://www.uncm.ru>

Composite materials have recently become ever wider accepted in many industries, particularly in aerospace, as at minimum weight, CM structures and products have high strength, are not prone to corrosion, and have longer service life. Ensuring high quality and reliability of CM products is impossible without application of effective modern NDT techniques. In this work, features of application of known NDT methods to CM are considered. 17 References, 1 Table, 6 Figures.

Key words: composite material, defects, nondestructive testing, radiation testing, ultrasonic testing, tomography, thermography

Поступила в редакцию
23.06.2014

3. Воробей В. В., Маркин В. Б. Контроль качества изготовления и технология ремонта композитных конструкций. – Новосибирск: Наука, 2006. – 190 с.
4. Корпорация «Olympus». Web: <http://www.olympus-ims.com/>
5. Барынин В. А., Будадин О. Н., Кульков А. А. Современные технологии неразрушающего контроля конструкций из полимерных композиционных материалов. – М.: Спектр, 2013. – 242 с.
6. Allen J. Fawcett (ATF/DER), Gary D. Oakes (ATF). Boeing Composite Airframe Damage Tolerance and Service Experience. Boeing Commercial Airplanes, 787 Program.
7. Kapadia A. Non Destructive Testing of Composite Materials. Best Practice Guide TWI Ltd National Composites Network.
8. Мурашов В. В. Контроль многослойных клееных конструкций из полимерных композиционных материалов // Клеи. Герметики. Технологии. – 2011. – № 10. – С. 16–23.
9. Мурашов В. В. Контроль клееных конструкций акустическим методом свободных колебаний // Там же. – 2012. – № 4. – С. 40–44.
10. Бакунов А. С., Мурашов В. В., Сысоев А. М. Контроль лопастей воздушного винта средствами низкочастотной акустики // Контроль. Диагностика. – 2012. – № 6. – С. 72–74.
11. Троицкий В. А. Пособие по радиографии сварных соединений. – Киев: Феникс, 2008. – 312 с.
12. Троицкий В. А. Флэш-радиография // Территория NDT. – 2013. – № 4. – С. 44–49.
13. Hamamatsu Photonics. Web: <http://www.hamamatsu.com>
14. Tschumperle D., Fadili J. Wire Structure Pattern Extraction and Tracking From X-Ray Images of composite Mechanisms. In proceeding of: 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2006), 17–22 June 2006, New York, USA.
15. Analysis of inner fracture surfaces in CFRP based on μ -CT image / R. Stoessel, O. Wirjadi, M. Godehardt et al. // Conference on Industrial Computed Tomography (ICT). – 19–21 Sept., 2012, Austria.
16. Филонин О. В. Малоракурсная компьютерная томография в физическом эксперименте. Ч. 1. Web: <http://www.science63.ru/nauka/166-malorakursnaya-kompyuternaya-tomografiya-v-fizicheskom-eksperimente.html>
17. Троицкий В. А., Глуховский В. Ю. Термографический контроль как метод, предшествующий стандартным видам технической диагностики // Междунар. конф. и выставка «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики»: Матер. конф. – Гурзуф, 2011. – С. 61–66.



ПОВЫШЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ И КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ УДАРНОЙ ОБРАБОТКОЙ И ЭЛЕКТРОИСКРОВЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ

Г. И. ПРОКОПЕНКО¹, Б. Н. МОРДЮК², В. В. КНЫШ², С. А. СОЛОВЕЙ², Т. В. ПОПОВА³

¹Ин-т металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАНУ. 03680, г. Киев, ГСП, бульвар Академика Вернадского, 36.

E-mail: bogachuk@imp.kiev.ua

²ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев, ГСП, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

³ГП «УкрНИИ вагоностроения». 39621, г. Кременчуг, ул. И. Приходько, 33. E-mail: kaplja_87@mail.ru

Для увеличения ресурса сварных конструкций с помощью ультразвуковой ударной обработки (УЗУО) создано новое портативное оборудование с использованием цифровой регулировки электрических параметров ультразвукового генератора с выходной мощностью до 650 Вт и частотой около 27 кГц. Испытания на усталость образцов низколегированных конструкционных сталей показали существенное увеличение циклической долговечности после УЗУО сварных швов. Данная обработка снижает также коррозию соединений за счет образования в поверхностном слое мелкозернистой структуры и сжимающих напряжений. Предложен метод дополнительного увеличения долговечности сварных соединений при испытаниях в 3%-ном водном растворе NaCl, заключающийся в последовательном использовании УЗУО и электроискрового легирования зоны шва хромом. Библиогр. 20, табл. 2, рис. 5.

Ключевые слова: ультразвуковая ударная обработка, ультразвуковой генератор, низколегированные конструкционные стали, сварные соединения, усталость, коррозия, электроискровое легирование

Основными факторами, которые ограничивают долговечность разнообразных промышленных изделий, являются износ, коррозия и усталость металлов. Разрушение, как правило, начинается с рабочих поверхностей изделий, которые подвергаются внешним температурно-силовым влияниям, действию агрессивных сред или циклической нагрузке. В настоящее время создано большое количество способов модификации поверхностей деталей и элементов конструкций. К упрочняющим обработкам относятся способы поверхностной пластической деформации (ППД): традиционная дробеструйная обработка, обкатка поверхности шариками или роликами и др. Используют для этой цели также энергию УЗ колебаний. Высоко-частотные удары стержневых деформирующих элементов небольшой массы (3...5 г), инициируемые мощным ультразвуком, приводят к существенным изменениям структуры поверхностного слоя металлов и сплавов [1–3]. Данная технология известна в мире как УЗ ударная обработка (УЗУО) или Ultrasonic Impact Treatment. С учетом того, что ударные элементы (бойки) принудительно колеблются в небольшом зазоре (примерно 0,01...0,02 мм) между концентратором УЗ колебаний и обрабатываемой поверхностью с частотой около 1...2 кГц, в литературе встречается также термин «высокочастотная механическая проковка (ВМП)» [4].

Известно, что прочность сварного соединения незначительна в результате изменения структуры при расплавлении металла, появления концентраторов напряжений и дефектов, а также возникновения растягивающих напряжений в зоне шва при его затвердевании. Если они складываются с внешними циклическими нагрузками, наступает преждевременное усталостное разрушение в зоне соединения, которое иногда приводит к катастрофическим последствиям. Растягивающие напряжения можно снизить нагреванием деталей, но для больших конструкций, как правило, применяют локальные методы обработки сварных соединений. Исследования показали, что УЗУО приводит к наиболее существенному снижению опасных растягивающих напряжений в зоне сварного шва и к повышению усталостной прочности образцов и элементов конструкций в сравнении с другими методами обработки [5–7]. Технология УЗУО зарекомендовала себя в мире как перспективная для увеличения ресурса сварных конструкций наряду с улучшением условий труда, экономичностью и другими преимуществами. Однако развитие этого направления в Украине сдерживалось отсутствием промышленного производства УЗ оборудования. В то же время здесь были созданы опытные образцы УЗ генераторов и ударных инструментов, а разработки способов и устройств защищены патентами [8, 9].



Цель данной работы состояла в создании нового УЗ оборудования, которое должно отвечать современному уровню разработок в использовании мощного ультразвука (до 2 кВт) и достижений в отрасли цифровых и микропроцессорных электронных технологий. В качестве излучателей ультразвука использовали высокочастотные пьезокерамические преобразователи с высоким КПД и малыми электрическими потерями. Созданное оборудование прошло опытную проверку в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины при обработке образцов низколегированных сталей, которые были испытаны на усталость, в том числе и в коррозионной среде. Поэтому основной задачей работы было повышение усталостной прочности и коррозионной стойкости сварных соединений методом УЗУО.

Разработка оборудования для УЗУО. Многолетний опыт применения УЗ обработки металлов для упрочнения поверхности позволяет сформулировать основные требования к УЗ излучателю и к ударному инструменту. Достижения последних лет в области создания современных высокоэффективных пьезокерамических материалов позволили отказаться от громоздких магнитострикционных источников УЗ колебаний, что дало толчок к последующему совершенствованию и созданию принципиально новых излучателей на основе пьезокерамических преобразователей большой мощности [10, 11]. Внедрение современных пьезоэлектрических преобразователей, которые имеют более чем в два раза больший КПД за счет высокой добротности, дало возможность отказаться от систем жидкостного охлаждения и уменьшить габариты и массу оборудования в несколько раз. Особенно это важно для переносных приборов, которые работают в полевых, иногда очень сложных условиях. В то же время была повышена частота УЗ колебаний с 22 до 27 кГц. Такое повышение частоты практически не влияет на технические характеристики оборудования для УЗУО, однако значительно уменьшает его общую массу примерно на 30 %. Задачей разработчиков было создание генераторов частотой 27 кГц с сохранением амплитуды колебаний торца волновода (концентратора УЗК) на уровне 20...25 мкм и массой инструмента не более 2,5 кг. Одним из основных преимуществ УЗ ударного инструмента, например, в сравнении с пневмодинамическим, является снижение вредных для организма человека шумов и вибраций его корпуса. Испытания, проведенные в Государственном НИИ «Гидро-

прибор» (г. Киев), показали, что шумы в УЗ и звуковом диапазоне частот не превышают допустимых норм, принятых в ГОСТ 12.1.001–89.

Использование новейших электронных технологий и современной элементной базы позволило создать компактный УЗ генератор (УЗГ) с габаритами 295×215×105 мм, массой 4,5 кг и мощностью до 650 Вт на частоте 27 кГц. Масса прибора с УЗ ударным инструментом составляет 6,2 кг (рис. 1). В нем использована полная автоматизация подстройки параметров УЗГ и защита электронной схемы от перегрузок.

Материалы и методики испытаний. В качестве сплавов на основе железа для исследований были выбраны низколегированные стали 20ГЛ и 15ХСНД. При малом содержании дорогих легирующих элементов они имеют невысокую стоимость и достаточную прочность наряду с высокой пластичностью. Данные стали характеризуются значительным сопротивлением усталости, а также высокими технологическими свойствами – они хорошо обрабатываются давлением и резанием, имеют хорошую свариваемость. Низкоуглеродистую сталь марки 20ГЛ применяют для изготовления ответственных литых деталей подвижного состава железнодорожного транспорта. Сталь 15ХСНД имеет более высокие механические свойства и применяется преимущественно при строительстве мостов.

Химический состав сталей и их механические свойства приведены в табл. 1 и 2.

Испытания на усталость круглых галтельных образцов по американскому стандарту ASTM E466 (рис. 2, а) проводили на универсальной сервогидравлической машине для механических испытаний типа INSTRON 8802. Испытывали партии по пять образцов для каждого состояния. Нагружение проводили по синусоидальной



Рис. 1. Общий вид оборудования для УЗУО

Таблица 1. Оптимальный химический состав сталей 20ГЛ и 15ХСНД, мас. %

Материал	C	Mn	Si	Ni	Cr	S	P
20ГЛ	0,19...0,20	1,20...1,40	0,35...0,60	–	–	< 0,04	< 0,04
15ХСНД	0,12...0,18	0,4...0,7	0,4...0,7	0,3...0,6	0,6...0,9	до 0,04	до 0,008



Таблица 2. Механические свойства сталей 20ГЛ и 15ХСНД

Материал	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ_5 , %	σ_{-1} , МПа	KCV, кДж/м ²	Коррозионная стойкость на воздухе, мм/год
20ГЛ	275	540	18	–	250 (20 °С)	–
15ХСНД, лист 10...32 мм	325	560	21	286	298 (– 40 °С)	до 0,0608

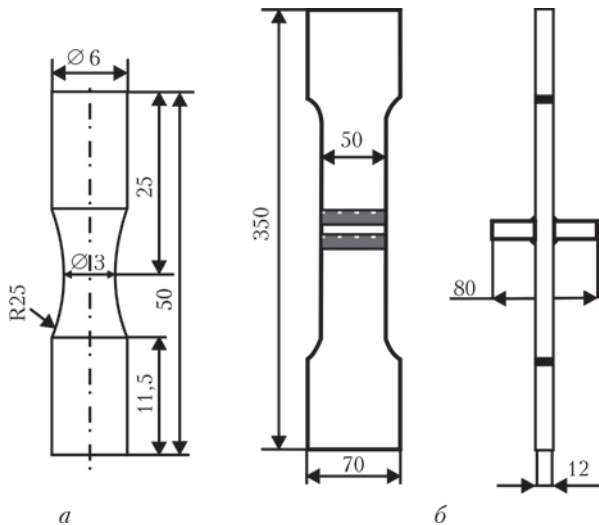


Рис. 2. Схематическое изображение образцов для усталостных испытаний; а – круглый галтельный образец; б – образец с тавровыми сварными соединениями для испытаний на усталость в коррозионной среде

кривой с частотой $f = 30$ Гц. Параметры нагрузки: $\sigma_{\min} = 0$ – минимальное напряжение цикла; $\sigma_{\max} = 0,7\sigma_b = 380$ МПа – максимальное напряжение цикла, коэффициент асимметрии цикла $K = 0,1$.

Испытания на коррозионную усталость проводили на образцах тавровых сварных соединений низколегированной стали 15ХСНД. Заготовки под образцы вырезали из листового проката так, чтобы более длинная сторона была ориентирована вдоль проката. Поперечные ребра приваривали угловыми швами с двух сторон ручной электродуговой сваркой электродами марки УОНИ 13/55 диаметром 3 и 4 мм. Форма и геометрические размеры образца приведены на рис. 2, б. Толщина образца 12 мм была обусловлена широкой применимостью в сварных металлоконструкциях проката толщиной 8...20 мм. Ширину образца 50 мм выбирали исходя из мощности испытательного оборудования.

Усталостные испытания сварных соединений выполняли на испытательной машине УРС-20 (рис. 3, а), которая ежегодно проходит поверку Государственным предприятием «Всеукраинский государственный научно-производственный центр стандарти-

зации, метрологии, сертификации и защиты прав потребителей» (ДП «Укрметртестстандарт»). Данная машина предназначена для определения механических свойств образцов материалов и элементов конструкций при статической и циклической нагрузке со знакопостоянным или знакопеременным циклом с частотой от 0,1 до 7 Гц. Максимальное усилие испытательной машины составляет ± 20 тс. Сварные соединения испытывали на усталость при одноосном растяжении с асимметрией цикла напряжений $K = 0,01$ и частоте циклической нагрузки 5 Гц.

Для испытаний на коррозионную усталость была сконструирована и изготовлена специальная емкость из нержавеющей стали объемом 1,2 л, которая закреплялась непосредственно на образце. В качестве коррозионной среды использовали 3 %-ный раствор NaCl. Общий вид емкости, в которой закреплялся образец во время испытаний на усталость, приведен на рис. 3, б.

Конструкция емкости обеспечивала постоянное пребывание всех четырех угловых швов и зоны термического влияния сварного соединения в коррозионной среде при циклическом нагружении. Размер рабочей части образца, которая

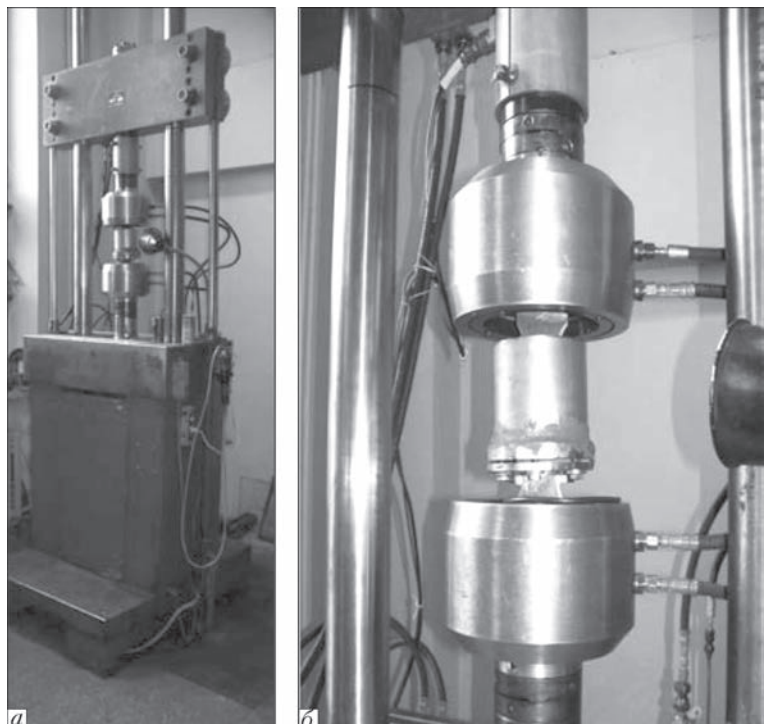


Рис. 3. Общий вид испытательной машины УРС-20 (а) и образец во время испытаний на коррозионную усталость (б)



постоянно находилась в 3 %-ном растворе NaCl, составлял 120 мм. После каждого испытания раствор обновлялся.

Результаты и их обсуждение. Методом УЗУО обрабатывается, как правило, узкая зона сплавления шва с основным металлом [1, 9] и, в большинстве случаев, этого достаточно для повышения усталостной прочности соединения, что способствует высокой производительности метода за счет локализации деформируемых участков шва и высокой частоты ударов бойков. В то же время известны работы по увеличению коррозионной стойкости металлических поверхностей после УЗУО вследствие образования поверхностного слоя с мелкозернистой структурой и определенным фазовым составом [12–14]. Представляло интерес применить для обработки сварных соединений вместе с УЗУО другой метод модификации поверхности. Наиболее простым и распространенным в промышленности является метод электроискрового легирования (ЭИЛ), который позволяет наносить покрытия различными металлами и может быть использован, как и УЗУО, для обработки локальных областей крупногабаритных конструкций, в том числе и сварных соединений [15].

Комбинированная обработка, при которой в одном технологическом цикле совмещаются разнообразные способы обработки поверхности металлических материалов – лазерная и электроискровая, плазменное и детонационное напыление, а также способы интенсивной пластической деформации (ИПД) поверхности [14, 16–18], является важным направлением развития технологий упрочнения и модификации рабочих поверхностей деталей и изделий. ИПД относится к перспективным способам обработки, в результате которой достигается высокая плотность дефектов кристаллического строения, что создает благоприятные условия для процессов диффузии и фазовых превращений, а также для образования мелкозернистых структур [1, 14, 16]. Следует отметить, что важным следствием ИПД является появление напряжений сжатия в поверхностных слоях деталей и конструкций, которые играют решающую роль в повышении их усталостной прочности и долговечности [3–6].

Перспективным путем создания покрытий с заданными свойствами является использование комбинированных воздействий, например, при сочетании ЭИЛ и УЗУО [13, 17]. ЭИЛ является одним из наиболее распространенных способов нанесения на детали упрочняющих покрытий, имеющих высокую прочность сцепления с деталью и уникальный комплекс физико-механических свойств. Однако электроискровые покрытия имеют значительную шероховатость и пористость, которая существенно снижает их экс-

плуатационные характеристики. Детали с нанесенными слоями легирующих веществ должны быть подвергнуты финишной обработке, которая может устранить указанные выше недостатки при сохранении или повышении необходимых механических, коррозионных и других свойств. Низкая энергоемкость метода и высокий процент использования материалов обеспечивают значительный экономический эффект (удешевление изделий и увеличение срока их эксплуатации).

Несмотря на малую энергию единичного удара при УЗУО, многократное ударное воздействие с высокой частотой приводит к уплотнению электроискровых покрытий с выглаживанием поверхности и снижением ее шероховатости. Кроме того, ускорение диффузионных процессов при УЗУО за счет локального возрастания температуры способствует увеличению адгезии покрытия к основному металлу, изменению его структуры и фазового состава.

Упрочнение поверхности образцов стали 20ГЛ изучали с помощью измерений микротвердости. Были проведены также усталостные испытания гладких образцов в исходном состоянии, после УЗУО и УЗУО + ЭИЛ. Для ЭИЛ поверхности образцов использовали стандартную промышленную установку «ЭЛИТРОН–22», которая работает на выпрямленном пульсирующем токе, с питанием от сети переменного тока напряжением 220 В. Применяли стержневые легирующие электроды Ni, Cr и Mo. Удельная скорость обработки составляла 1 мин/см² поверхности образца, при частоте колебаний электрода (анода) 100±3 Гц, энергии искрового разряда 1 Дж, длительности импульса 200 мкс, рабочем токе 1...3 А и напряжении на аноде 70 В. Перед проведением ЭИЛ образцов проводили их термообработку, которая заключалась в закалке от температуры 880...900 °С с последующим стабилизационным отжигом при 600...650 °С в течение часа. Такая термообработка позволяет получать микроструктуру с равномерным распределением структурных элементов без избыточного роста их размеров.

УЗ обработку проводили с использованием установки, представленной в работах [1, 8]. УЗУО вращающихся галтельных образцов осуществляли в токарном станке с числом оборотов в минуту $N = 120$, продольной подачей суппорта $S = 0,1$ мм/об, амплитудой колебаний торца концентратора $A = 15$ мкм и деформирующим элементом бойком седлообразной формы массой 15 г. Использовали магнитострикционный излучатель ПМС 15А-18 с резонансной частотой 18 кГц, питаемый от генератора УЗГ2-4М. Был выбран оптимальный режим УЗУО, при котором достигалась минимальная шероховатость и максимальная микротвердость поверхности образцов. Наибольшая степень деформации ϵ при УЗУО обычно



наблюдается в поверхностных слоях толщиной 30...50 мкм. Данные по микротвердости приведены на рис. 4. По сравнению с исходным состоянием после отжига поверхностная деформация с помощью УЗУО приводит к незначительному упрочнению (в 1,5 раза). Применение ЭИЛ способствует более существенному росту микротвердости, особенно в случае легирования хромом и молибденом. Причина такого отличия в механических свойствах полученных слоев заключается в особенностях структурного и фазового состояний, формируемых при комбинированной обработке ЭИЛ+УЗУО. Применение ЭИЛ+УЗУО приводит к существенному упрочнению – в случае легирования никелем в 1,3...1,5 раза, хромом в 2,0...3,5 раза и молибденом в 2,7...4,3 раза.

При легировании хромом и молибденом в поверхностном слое формируются ОЦК твердые растворы Fe–Cr и Fe–Mo, упрочненные интерметаллидными и/или карбидными фазами, а при легировании Ni – ГЦК твердый раствор Fe–Ni [15]. Следующая за ЭИЛ УЗУО ведет к существенному снижению шероховатости образцов. Все сформированные комбинированной обработкой поверхностные слои стали 20ГЛ, легированные никелем, хромом и молибденом, характеризуются большим потенциалом коррозии и меньшим током коррозии по сравнению с образцами в исходном состоянии, что свидетельствует об их повышенной стойкости к электрохимической коррозии [15].

Результаты испытаний круглых галтельных образцов (рис. 2, а) стали 20ГЛ показывают, что после шлифовки рабочей поверхности образца среднее количество циклов до разрушения составляет 154259 циклов. Долговечность образцов после УЗУО существенно возросла, достигнув 10^6 циклов (образцы не разрушались). Для электроискрового покрытия был выбран электрод из молибдена, который показал наибольшее упрочнение поверхности образца (рис. 4). После ЭИЛ молиб-

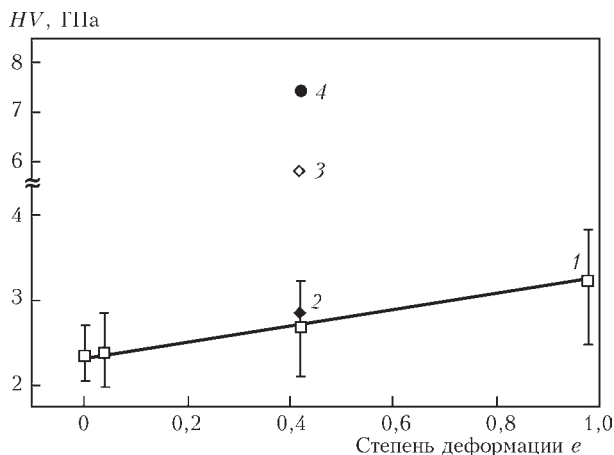


Рис. 4. Зависимость микротвердости от времени обработки при УЗУО (1) и после ЭИЛ+УЗУО при легировании Ni (2), Cr (3) и Mo (4)

деном с дальнейшей УЗУО по выбранным режимам долговечность возросла до 439564 цикла, что в 2 раза меньше, чем только после УЗУО. Очевидно, что электроискровые покрытия формируют в поверхности структуру, имеющую сложный фазовый состав. В него входят твердые растворы FeMo с ОЦК решеткой, интерметаллиды $\text{Fe}_{63}\text{Mo}_{37}$, оксиды, которые снижают пластичность поверхностного слоя и усталостную прочность. По-видимому, следует подбирать легирующие элементы, исходя из диаграмм состояния двойных систем, чтобы наряду с увеличением коррозионной стойкости добиться приемлемой усталостной прочности.

Обработка зоны сплавления сварных швов с помощью УЗУО повышает усталостную прочность и долговечность соединений при испытаниях в коррозионной среде по сравнению с исходными после сварки образцами низколегированных сталей [19]. В настоящей работе испытывали образцы тавровых соединений (рис. 2, б). Результаты усталостных испытаний образцов стали 15ХСНД на воздухе и в 3%-ном растворе NaCl приведены на рис. 5, а. Долговечность необработанных образцов сразу после сварки при $\sigma_{\text{max}} = 260$ МПа составляла в среднем 130 тыс. циклов (точка 0 на графике). После УЗУО линии сплавления при испытаниях в коррозионной среде усталостная прочность значительно возрастает, что соответствует линии 1 на рис. 5, а. Видно, что долговечность на уровне 260 МПа повышается до 900 тыс. циклов. Для сравнения приведены испытания на воздухе после УЗУО образцов.

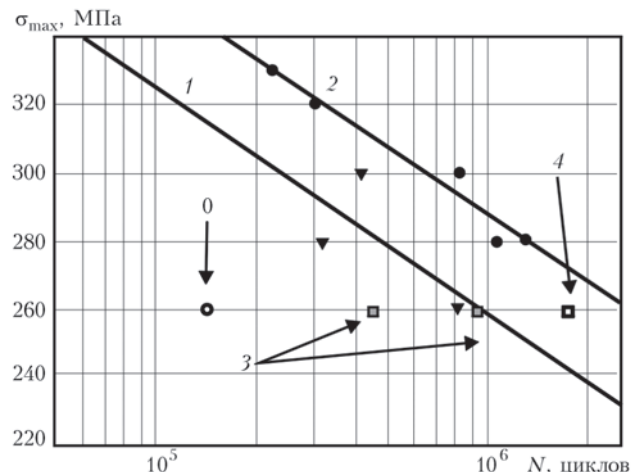


Рис. 5. Результаты усталостных испытаний сварных образцов стали 15ХСНД: а – после сварки (0) и после УЗУО (1–4) на воздухе (2) и в 3%-ном растворе NaCl (1,3,4) после УЗУО без ЭИЛ (2), ЭИЛ(Ni)+ УЗУО (3) и УЗУО+ЭИЛ(Cr)+УЗУО (4); б – образец после испытаний



Экспериментальные точки хорошо укладываются на прямую линию (рис. 5, а, кривая 2), что соответствует долговечности $3,6 \cdot 10^6$ циклов при $\sigma_{\max} = 260$ МПа. Испытания на этом уровне напряжений в 3%-ном растворе NaCl образцов, обработанных ЭИЛ никелем и УЗУО, показали среднюю долговечность 586 тыс. циклов (три образца, которым соответствуют точки 3 на рис. 5, а, разрушились при 424500, 457600 и 876300 циклах). Экспериментальные точки лежат ниже кривой 1.

Таким образом, никель не является оптимальным материалом для покрытия. Причиной снижения коррозионно-усталостной прочности образцов после ЭИЛ никелем с последующей УЗУО является не только образование хрупких фаз при высокочастотном ударном нагружении. Скорее всего, предварительное легирование поверхности затрудняет пластическую деформацию, что может сказаться и на уровне остаточных сжимающих напряжений в зоне шва после УЗУО. Поэтому был предложен способ комбинированной обработки, когда образец сначала подвергался УЗУО не только по линии сплавления, а по ширине зоны, в которой присутствуют растягивающие напряжения после сварки. Затем эта зона насыщалась с помощью ЭИЛ хромом, который с точки зрения образования хрупких соединений предпочтительнее никеля. Затем проводили окончательную обработку поверхности с помощью УЗУО для устранения повышенной шероховатости и уплотнения поверхностного слоя. В этом случае долговечность образцов повысилась до 1800 тыс. циклов. Большинство образцов разрушалось по ребру (рис. 5, б), что является характерной особенностью усталостных испытаний образцов стали 15ХСНД в коррозионной среде. Полученные результаты согласуются с данными работы [20], в которой использовались различные режимы дробеструйной обработки стали до и после нанесения покрытий хрома с целью увеличения сопротивления усталости.

Следует отметить, что гарантийные сроки эксплуатации многих ответственных сварных конструкций составляют десятки лет, потому данный метод является реальной мерой предупреждения преждевременного разрушения таких конструкций. В целом технология УЗУО продлевает сроки их эксплуатации, сохраняет материальные ресурсы, предотвращает нанесение ущерба окружающей среде. Широкое внедрение технологии и оборудование для УЗУО в промышленность Украины даст возможность существенно повысить надежность и долговечность ответственных сооружений, таких как мосты и путепроводы, а также машин и механизмов на железнодорожном транспорте, в горнодобывающей промышленности и в других отраслях народного хозяйства.

Выводы

Разработано и изготовлено малогабаритное оборудование для УЗУО изделий и конструкций с излучателем на пьезокерамике. В УЗ генераторе использованы новые достижения в области микропроцессорной и цифровой техники, что позволило существенно уменьшить его массу и размеры.

Применение ЭИЛ поверхности стали 20ГЛ приводит к ее существенному упрочнению в случае легирования никелем (в 1,3...1,5 раза), хромом (в 2,0...3,5 раза) и молибденом (в 2,7...4,3 раза) по сравнению с УЗУО. Причина такого отличия в механических свойствах заключается в особенностях структурного и фазового состояний, формируемых при комбинированной обработке ЭИЛ+УЗУО разными элементами. Легирование молибденом с последующей УЗУО повышает долговечность образцов в 2,8 раза относительно исходного состояния после отжига и шлифовки.

Комбинированная обработка УЗУО + ЭИЛ (при легировании хромом) + УЗУО существенно увеличивает коррозионно-усталостную прочность сварных соединений стали 15ХСНД, которая становится сравнимой с теми значениями, которые получены для обработанных УЗУО образцов и испытанных на воздухе.

1. Структурные изменения в зоне сварного шва стали Ст3 при ультразвуковой ударной обработке и их влияние на повышение сопротивления усталости / П. Ю. Волосевич, Г. И. Прокопенко, В. В. Кныш и др. // Металлофизика и новейшие технологии. – 2008. – 30, № 10. – С. 1429–1443.
2. Структура, фазовый состав и механизмы упрочнения аустенитной стали, подвергнутой ультразвуковой обработке бойками / В. А. Клименов, Ю. Ф. Иванов, О. Б. Перевалова и др. // Физ. и хим. обработки материалов. – 2001. – № 1. – С. 90–97.
3. The effects of ultrasonic peening treatment on the ultra-long life fatigue behavior of welded joints / D.Yin, D.Wang, H.Jing, L. Huo // Materials and Design. – 2010. – 31. – P. 3299–3307.
4. Повышение сопротивления усталости сварных соединений металлоконструкций высокочастотной механической проковкой (Обзор) / Л. М. Лобанов, В. И. Кирьян, В. В. Кныш, Г. И. Прокопенко // Автомат. сварка. – 2006. – № 9. – С. 3–11.
5. Разработка и оптимизация оборудования и процесса ультразвуковой ударной обработки сварных соединений с целью снижения остаточных напряжений / Г. И. Прокопенко, А. Я. Недосека, А. А. Грузд, Т. А. Красовский // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 1995. – № 3. – С. 14–22.
6. Statnikov E. Sh. Applications of Operational Ultrasonic Impact Treatment Technologies in Production of Welded Joints // Welding in the World. – 2000. – 44, № 3. – Doc.XIII-1667–97.
7. Дегтярев В. А., Шульгинов Б. С. Оценка эффективности методов повышения сопротивления усталости сварных соединений при ударном нагружении в условиях низкой температуры // Пробл. прочности. – 2000. – № 6. – С. 115–123.
8. Pat. 6,467,321 B2 USA. Device for ultrasonic peening of metals. / G. Prokopenko, J. Kleiman, O. Kozlov et al. – Oct. 22, 2002.
9. Пат. № 60390 Україна. Спосіб обробки зварних з'єднань металоконструкцій високочастотною проковкою /



- Л. М. Лобанов, П. П. Михеев, Г. І. Прокопенко та ін. – Бюл. № 10 від 15.10.2003.
10. Prokić M. Piezoelectric Transducers Modeling and Characterization. – Bern: Published in Switzerland by MPI, 2004. – 266 p.
11. Грінченко В. Т., Вовк І. В., Мацупура В. Т. Основы акустики. – Київ: Наук. думка, 2007. – 640 с.
12. Бабей Ю. И. Повышение усталостной и коррозионно-усталостной прочности валов в прессовых соединениях механо-ультразвуковой обработкой // ФХММ. – 1976. – 12, № 1. – С. 111–112.
13. Фізико-механічні властивості ливарної сталі 20ГЛ після електроіскрового легування та ультразвукової ударної обробки/ Г. І. Прокопенко, В. Ф. Мазанко, Б. М. Мордюк та ін. // Вісник ТНТУ. – 2013. – №3 (71). – С. 170–181.
14. Панин В. Е., Сергеев В. П., Панин А. В. Наноструктурирование поверхностных слоев конструкционных материалов и нанесение наноструктурных покрытий. – Томск: Изд-во Томск. политех. ун-та, 2009. – 285 с.
15. Лазаренко Н. И. Электронискровое легирование металлических поверхностей. – М.: Машиностроение, 1976. – 144 с.
16. Estrin Y., Vinogradov A. Extreme grain refinement by severe plastic deformation: A wealth of challenging science // Acta Materialia. – 61. – 2013. – P. 782–817.
17. Чигринова Н. М., Кулешов А. А., Нелаев В. В. Микроплазменное легирование с ультразвуковой модификацией поверхности // Электронная обработка материалов. – 2010. – № 2. – С. 27.
18. Tang X., Li D. Y. Production of alloyed nanocrystalline surfaces by combined punching, sandblasting and recovery treatments // Scripta Mater. – 2008. – 58. – P. 1090–1093.
19. Спротивлення корозійній усталості сварних з'єдинень, упрочнених високочастотною механічною проковкою / В. В. Кныш, С. А. Соловей, А. З. Кузьменко, И. И. Вальтерис // Автомат. сварка. – 2008. – № 4. – С. 5–8.
20. Gao Y., Li X., Yang Q., Yao M. Influence of surface integrity on fatigue strength of 40CrNi2Si2MoVA steel // Materials Letters. – 2007. – 61. – P. 466–469.

To increase the operation life of welded structures by ultrasonic impact treatment (UIT) new portable equipment was created. This equipment is supplied with 27 kHz ultrasonic generator of 650 W power output with digitally adjusted electrical parameters. Fatigue tests of samples of a number of low alloyed structural steels showed a significant increase in cyclic durability of welded seams after the UIT process. This treatment also reduced the corrosive degradation of welded joints due to ultrafine-grained structure and compressive residual stresses formed in the surface layer. A method for additional increase in durability of welded joints tested in a 3% NaCl aqueous solution was suggested. It consisted of the successive UIT process and electric spark alloying of seam area with chromium. 20 References, 2 Tables, 5 Figures.

Key words: Ultrasonic Impact Treatment, Ultrasonic Generator, Low Alloyed Structural Steels, Welded Joints, Fatigue, Corrosion, Electric Spark Alloying

Поступила в редакцию
24.06.2014

5-я МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «МЕХАНИКА РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ И ПРОЧНОСТЬ КОНСТРУКЦИЙ»

24–27 июня 2014 г. во Львове на базе Национального университета «Львовская политехника» состоялась 5-я Международная конференция «Механика разрушения материалов и прочность конструкций».

Организаторами конференции выступили Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко НАН Украины, Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Национальный университет «Львовская политехника» и Украинское общество по механике разрушения материалов.



Для участия в конференции было заявлено более 200 докладов из 50 организаций, которые представляли ведущие академические институты, государственные научные центры, вузы, частные организации и промышленные предприятия Украины, Польши, Франции и Мексики.

Конференцию открыл председатель организационного комитета, директор ФМИ им. Г. В. Карпенко НАНУ, академик НАН Украины В. В. Панасюк, который в своем вступительном слове подчеркнул необходимость проведения подобного рода мероприятий с целью обмена опытом и налаживания научных и дружественных отношений между сотрудниками различных учреждений, представленных на конференции.

В работе конференции приняли участие более 190 ученых, в том числе 137 докторов и кандидатов наук. Было заслушано и обсуждено 26 пленарных, 44 секционных и 47 стендовых докладов, предусмотренных программой конференции.

От ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ на конференции было представлено более десяти докладов, в числе которых Л. Лобанов, В. Кныш, И. Клочков «Повышение циклической долговечности тонколистовых сварных соединений легких сплавов высокочастотной проковкой»; В. Позняков, Л. Маркашова, Т. Алексеенко, А. Максименко «Изменение структуры и механических свойств в стали 10Г2ФБ при сварке и во время циклического нагружения изгибом».

Проведение конференции способствовало установлению деловых контактов в области механики разрушения материалов, прочности конструкций и оценки ресурса работоспособности ответственных деталей и конструкций.



ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ ДЛЯ ДІАГНОСТУВАННЯ КОРПУСІВ ЯДЕРНИХ РЕАКТОРІВ (огляд)

Повідомлення І. Еволюція застосування неруйнівного контролю у світовій ядерній енергетиці

І. М. НЕКЛЮДОВ, З. Т. НАЗАРЧУК, В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ, Л. Н. ДОБРОВОЛЬСЬКА

Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАНУ. 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5. E-mail: skal@ipm.lviv.ua

Проаналізовано етапи розвитку методу акустичної емісії для діагностування стану об'єктів ядерної енергетики. Показано, що методи неруйнівного контролю (НК) відіграють надзвичайно важливу роль у забезпеченні безаварійної роботи корпусів реакторів АЕС. Їх впровадження на етапі виготовлення та експлуатування ядерних реакторів зазнало суттєвого розвитку впродовж кількох десятиріч. Перша згадка про це датована 1958 р., коли відбувся симпозіум щодо застосування методів НК у ядерній енергетиці. На ньому відзначено застосування радіографічного методу та наголошено на необхідності використання інших методів НК для повної перевірки якості корпусів ядерних реакторів. Згодом появився Кодекс нормативів для котлів та ємностей, що працюють під тиском, розроблений Американським товариством інженерів, один із розділів якого присвячено формулюванню мінімальних вимог до виготовлення ємностей і охоплював візуальну перевірку та діагностування цілісності корпусу за допомогою стандартизованих методів НК, як то магнітопорошкового, проникаючих рідин, радіографії, ультразвукової дефектоскопії та вихрострумового. Особливу увагу на етапі виготовлення корпусу реактора приділяли зварним з'єднанням. Як показано в огляді на підставі аналізу літературних джерел, у всіх провідних країнах світу продовжує розвиватись ядерна енергетика, а разом з нею і застосування методів НК, в тому числі і акустичної емісії. Під це підведена відповідна нормативна база, що дозволяє поставити НК на промисловий рівень і уникати протиріч в тлумаченні результатів діагностування. Висвітлено важливість робіт, які проведені вітчизняними та зарубіжними фахівцями стосовно оцінювання стану корпусів реакторів ВВЕР та описано відповідні засоби, що використовують для цього. Бібліогр. 96.

Ключові слова: акустична емісія, ядерні реактори, діагностування, світова ядерна енергетика

Стан проблеми. Методи неруйнівного контролю (НК) призначені для виявлення, локації та встановлення параметрів дефектів у елементах конструкцій. Інформація щодо кількості, розташування та морфології дефектів є підставою для розрахунків залишкового ресурсу об'єктів експлуатації. Для обладнання та металоконструкцій АЕС це має винятково важливе значення, оскільки ядерні енергоустановки як об'єкти надвисокої небезпеки, вимагають відповідного рівня надійності їх експлуатування. Це, насамперед, стосується ядерного реактора та обладнання, яке забезпечує його функціонування, особливо з огляду на те, що корпус реактора не може бути замінений впродовж всього терміну експлуатування енергоблоку.

Підходи до оцінювання надійності та безпеки експлуатування корпусів реакторів розвивались десятиріччями завдяки дослідженням, які проводили одночасно у трьох напрямках:

- оцінювання граничних умов руйнування;
- методи діагностування;
- оцінювання залишкового ресурсу.

Серед методів діагностування важливе місце належить методам НК, використання яких (пряме чи непряме) допомагає експлуатаційникам та контролюючим органам відстежувати стан і пов'яза-

ну з ним безпеку реактора [1]. Використання НК можна поділити на кілька категорій:

- пряме застосування НК корпусів промислових реакторів;
- пряме застосування НК корпусів модельних реакторів;
- застосування методів НК у лабораторних умовах для вивчення процесів деградування корпусних реакторних сталей та розроблення методик для впровадження на об'єктах контролю;

Пряме застосування НК корпусів промислових реакторів здійснюють на етапі виготовлення та в процесі експлуатування, але не під час їх роботи, а тільки під час зупинок та ремонтів. Значно ширшим є досвід використання НК на корпусах модельних реакторів.

Впровадження методів НК на етапі виготовлення та експлуатування ядерних реакторів зазнало суттєвого розвитку впродовж кількох десятиріч. Вже у 1958 р. відбувся симпозіум щодо застосування методів НК у ядерній енергетиці, де МакГонагл відзначав застосування радіографічного методу та необхідність використання інших методів НК для повної перевірки якості корпусів ядерних реакторів [2]. Згодом у своєму огляді 1965 р., присвяченому застосуванню НК на етапі



виготовлення корпусів ядерних реакторів [3], цей автор посилатиметься на діючий Кодекс нормативів для котлів та ємностей під тиском, розроблений Американським товариством інженерів-механіків (ASME Boiler and Pressure Vessel Code), один із розділів якого був присвячений формулюванню мінімальних вимог до виготовлення ємностей, що працюють під тиском [4] і згідно з яким виготовляли корпуси ядерних реакторів. Процес виготовлення охоплював візуальну перевірку та діагностування цілісності корпусу за допомогою стандартизованих методів НК, як то магнітопорошкового [5–8], проникаючих рідин [9], радіографії [10–13], ультразвукової дефектоскопії [14–16] та вихрострумового [17]. Особливу увагу на етапі виготовлення корпусу реактора приділяли зварним з'єднанням [18–20].

У 1970 р. відбулось кілька форумів науковців та інженерів, на яких обговорювали результати досліджень щодо застосування методів НК для підвищення експлуатаційної надійності ядерних енергоустановок. Одним із них був симпозіум з питань НК елементів ядерних реакторів, що відбувся у 1970 р. в Роттердамі [21]. На ньому обговорювали Кодекс ASME нормативів для котлів та ємностей під тиском, один із розділів якого був присвячений методам діагностування та контролю, в тому числі і неруйнівним [22, 23], і у відповідності до якого розробляли підходи до НК корпусів ядерних реакторів. Більшість доповідей тоді була присвячена використанню НК на етапі виготовлення корпусу реактора перед введенням його в експлуатацію. Наголос робили на використанні УЗ дефектоскопії та радіографічного контролю. Щодо можливого застосування НК під час роботи реактора, то серед перспективних був названий метод акустичної емісії, який, як наголошували, має суттєві переваги, наприклад, можливість локації активних дефектів [22].

Про десятирічний досвід використання УЗ дефектоскопії корпусу ядерного реактора як на етапі виготовлення, так і під час його експлуатації доповідали на черговому з'їзді ASME у 1973 р. [24]. Ця праця розпочалася із УЗ діагностування корпусу реактора киплячого типу на АЕС Елк Ривер (США), який був введений в експлуатацію у 1963 р. Від того часу УЗ дефектоскопія матиме пріоритет перед іншими методами НК [25], причому для її якісного проведення вже на початку 1970-х років були створені відповідні механічні маніпулятори для дистанційного керування [26–28]. Інші методи НК розглядали тоді як перспективні. Із розвитком теоретичних напрацювань, експериментальних досліджень та інструментальної бази НК щораз виникала потреба оновлювати нормативні документи стосовно діагностування корпусів реакторів [29–31].

Розвиток методології НК корпусів реакторів АЕС. У 1972 р., аналізуючи стан НК на атомних електростанціях Японії, Міоші зазначив, що вимоги розділу XI Кодексу ASME були адаптовані у всіх країнах-виробниках атомної електроенергії, а впровадження таких методів НК, як проникаючих рідин, магнітопорошкового, радіографічного та УЗ дефектоскопії, наштовхується на деякі проблеми [32]. Найбільш задовільним для японських інженерів у той час виглядав метод УЗ дефектоскопії, який використовував різні методики виявлення дефектів: нормального зондування, кутового зондування тощо, які дозволяли з високою відтворюваністю виявляти та встановлювати параметри існуючих у корпусі дефектів [33, 34]. Паралельно японські дослідники вивчали перспективи використання методу вимірювання електропровідності реакторної сталі для відстежування процесу її деградування [22].

У цьому ж 1972 р. у Лондоні відбулася міжнародна конференція на тему періодичної інспекції корпусів ядерних реакторів, на якій зазначали, що обладнання для НК повинно витримувати високий рівень радіації та інших впливів середовища і при цьому проявляти високу надійність, чутливість та відтворюваність вимірювань [35]. Обговорювали можливості впровадження таких методів, як УЗ дефектоскопія, акустична голографія, ікс-променева дифрактометрія, акустична емісія, причому доповідачі ділились досвідом діагностування корпусів ядерних реакторів у Аргентині, Великобританії, Німеччині, США та Японії.

У Великобританії, де перший комерційний ядерний реактор був введений в експлуатацію ще у 1956 р., питанням НК корпусів ядерних реакторів приділяли особливу увагу. В Управлінні атомною енергією Великобританії (United Kingdom Atomic Energy Authority – UKAEA) було створено спеціальну службу для інспектування атомних електростанцій, послугами якої користувалися також інші європейські країни. Наприклад, у 1971 р. ця служба проводила перевірку корпусу бельгійського реактора типу PWR виробництва фірми «Westinghouse». Корпус цього реактора, який був виготовлений зі сталі SA-302 Grade B з аустенітною наплавкою на внутрішній поверхні, діагностували, використовуючи УЗ дефектоскопію та телекамеру за умов заповнення корпусу водою. Переміщення обладнання здійснювали дистанційно за допомогою маніпуляторів [36, 37].

У Німеччині впровадження методів НК домінувало на етапі виготовлення корпусів, причому використовували переважно такі методи, як радіографічний, УЗ та проникаючих рідин [38, 39]. НК корпусів діючих реакторів обмежувався періодичним візуальним контролем та УЗ дефектоскопією, яку вже у 1970-х роках виконували дистанційно за



допомогою маніпуляторів [40–42]. Інші методи, як наприклад, вихрострумовий, застосовували тоді в лабораторних умовах [43].

У період з 1976 по 1989 рр. були введені в експлуатацію системи зовнішнього контролю корпусів реакторів в колишньому СРСР на Південноукраїнській, Запорізькій, Хмельницькій та Рівненській АЕС, на Балаковській, Кольській, Калінінській та Нововоронежській АЕС (тепер Російська Федерація), а також на АЕС Loviisa (Фінляндія), Paks (Угорщина), Bohunice (Словаччина), Dukovany (Чехія), Greifswald (Німеччина), Козлодуй (Болгарія). На згаданих АЕС було впроваджено періодичне зовнішнє обстеження корпусів реакторів. У 1988 р. на Нововоронежській АЕС, а згодом і на інших АЕС, обладнаних реакторами ВВЕР-1000, встановлено систему контролю корпусу реактора зсередини [44].

Відзначимо, що розвиток впровадження методів НК для діагностування корпусів ядерних реакторів завдячує низці періодичних міжнародних форумів, серед яких виділимо такі:

- міжнародні конференції на тему «NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components» (неруйнівне діагностування, пов'язане зі структурною цілісністю елементів, що підлягають впливу радіації та тиску), в яких брали активну участь, зокрема, й українські вчені. Остання (дев'ята) конференція з цієї серії відбулась у 2012 р. у Вашингтоні [45];

- міжнародні конференції на тему «Periodic Inspection of Pressurized Components» (періодичне інспектування компонентів, що працюють під тиском), які організовувала британська Institution of Mechanical Engineers (Інституція інженерів-механіків) і які відбувались у Лондоні у 1970-х роках;

- міжнародні конференції з НК «European Conference on Nondestructive Testing» [46] та «World Conference on Nondestructive Testing» (Європейська та Світова конференції з неруйнівного контролю) [47], що були започатковані у 1970-х роках;

- міжнародні конференції на тему «Pressure Vessel Technology» (технологія ємностей, що працюють під тиском), започатковані у 1973 р. товариством ASME [48];

- міжнародні конференції на тему «Nondestructive Evaluation in the Nuclear Industry» (неруйнівний контроль у ядерній промисловості);

- міжнародні конференції на тему «Nondestructive Evaluation in the Nuclear and Pressure Vessel Industries» (неруйнівний контроль у атомній промисловості та у сфері виготовлення ємностей, що працюють під тиском).

На таких форумах, а також на сторінках різних часописів науковці та інженери представляли результати своїх досліджень, які досить щедро фінансувалися, сприяючи розвитку методів НК.

Отож атомна енергетика з її високою вимогою до безпеки експлуатування ядерних реакторів та інших відповідальних елементів суттєво спричинилася до розвитку методів НК, серед яких можна відзначити і метод акустичної емісії.

У різних країнах історично склалися свої особливості застосування неруйнівних методів діагностування для оцінювання стану елементів ядерних реакторів. У своєму звіті щодо впливу радіаційного окрихчування на деградування сталей та пов'язаною з цим цілісністю корпусів ядерних реакторів на атомних електростанціях Міжнародна Агенція з Атомної Енергії ІАЕА зазначає, що у різних країнах використовують нормативні документи, в яких є як спільні положення, так і свої особливості [49]. Наприклад, у США корпуси реакторів контролюються згідно з розділом XI Кодексу ASME [23], за яким під час експлуатування ядерних реакторів використовують три типи контролю: візуальний, поверхневий та об'ємний. Їх результати порівнюють із даними, отриманими перед уведенням реактора в експлуатацію. Контроль здійснюють за програмою, встановленою для кожного реактора. Особлива увага надається зварним з'єднанням, внутрішнім поверхням металу патрубків, різьбовим з'єднанням фланців. При цьому рівень кваліфікації персоналу, методи та обладнання повинні перевірятися на навчальних макетах та стендах, що імітують діюче обладнання. Зауважимо, що такі вимоги прописані не тільки у Кодексі ASME, але й у нормативних документах Європейської Мережі Інспекцій та Кваліфікацій (European Network for Inspection and Qualification – ENIQ) [50]. Нормативні документи інших країн світу досить близькі, якщо не ідентичні, до сутнісної частини розділу XI Кодексу ASME, що стосується НК ядерних реакторів.

На сьогодні усі дефекти, виявлені в корпусах ядерних реакторів світу, пройшли процедуру оцінювання відповідно до вимог розділу XI Кодексу ASME в частинах IWB-3500, тобто Стандарту задовільності (Acceptance Standards) та IWB-3600, що встановлює процедуру аналітичного розрахунку дефектів (analytical evaluation of flaws), яка базується на принципах механіки руйнування [51]. Жоден із виявлених у корпусах ядерних реакторів дефектів не увійшов в категорію небезпечних та не потребував усунення шляхом заварювання.

Незначні відмінності від Кодексу ASME спостерігаються у нормативних документах Франції, Німеччини та Японії, які ввели у свої нормативні бази деякі національні особливості ядерної галузі. Наприклад, у Німеччині контроль цілісності корпусів ядерних реакторів був запроваджений ще в кінці 1960-х років, а у 1972 р. з'явилися Рекомендації до контролю, які видав Комітет стандартів ядерної безпеки (Kerntechnischer Ausschuss



– КТА). Цей документ згодом трансформувався у відповідний Кодекс з Техніки Безпеки КТА 3201 (Sicherheitstechnische Regel des KTA) – один із головних зобов'язуючих нормативних документів для виробників обладнання та експлуатаційників АЕС [52]. У КТА 3201.4 сформульовані вимоги до моніторингу працюючого обладнання; періодичного НК; запису, аналізу та впровадження нових процедур, пов'язаних із безпекою експлуатування; прогнозування змін фізичного стану обладнання першого контуру на підставі повторних перевірок та моніторингу; оцінювання результатів періодичних перевірок та моніторингу під час експлуатування. Перекликаючись із Кодексом ASME, цей документ робить найбільший наголос на ультразвуковому методі оцінювання розміру дефектів. У 1995 р. у німецькі нормативні документи додали вихрострумний метод та відеоінспекцію, що виконується за допомогою маніпулятора. Дотичними до КТА 3201.4 є всі підрозділи Кодексу КТА 3201 [53–55] та інші нормативні документи КТА [56–58], як також і 16 зобов'язуючих національних стандартів Німеччини, значна частина яких частково або повністю відповідає міжнародним нормативним документам.

Однією з функцій первинного контуру, згідно з КТА 3201.4, є надійне утримування теплоносія, який охолоджує ядерний реактор, впродовж усього терміну експлуатування енергоблоку [52]. Для забезпечення цієї функції здійснюють операційний моніторинг та експлуатаційний контроль якості оболонки першого контуру. Щодо операційного моніторингу працюючого обладнання, то його завданням є відстежувати як фізико-хімічні параметри процесів, що можуть призвести до порушення цілісності оболонки, так і параметри процесів, що характеризують наслідки такого порушення. До перших належить моніторинг стандартних параметрів первинного контуру – температури, тиску, потужності тощо, тоді як до других – можливі витoki з первинного контуру, наявність незакріплених металевих об'єктів, вібраційні характеристики обладнання першого контуру тощо.

Експлуатаційний контроль (in-service inspection – ISI) цілісності оболонки першого контуру включає: періодичний НК внутрішньої та зовнішньої поверхонь, а де потрібно і об'єму стінок, що утримують тиск першого контуру; оцінювання загального фізичного стану обладнання першого контуру під час періодичних оглядів; гідростатичні випробування цілісності першого контуру; функціональні тести систем захисту від перевищення тиску. Саме завдяки НК під час експлуатаційного контролю виявляють дефекти, що виникли в обладнанні первинного контуру, після чого їхній ступінь небезпеки оцінюють із використанням по-

переднього досвіду та відстежують у кожній наступній процедурі експлуатаційного контролю.

У Німеччині обов'язковими для перевірки поверхні обладнання першого контуру є такі методи НК: магнітопорошковий, рідиннопроникаючий, вихрострумний, радіографічний, УЗ дефектоскопія, візуального огляду. Для перевірки цілісності/дефектності об'єму металу рекомендовано використовувати УЗ дефектоскопію, радіографічний та вихрострумний методи. Застосування інших методів, як НК, так і руйнівних, дозволяється на деталях, які виводяться із експлуатування та замінюються на інші [52]. Потрібно зауважити, що головним методом НК цілісності обладнання першого контуру і тут слугує УЗ дефектоскопія, яку використовують для перевірки дефектності всіх зварних швів корпусу реактора, включаючи патрубки під час планових і непланових ремонтів через кожні чотири або п'ять років. Інші методи застосовують у значно меншому обсязі і значно рідше.

У Франції вимоги до контролю цілісності корпусів реакторів та їх діагностування за допомогою методів НК також специфічні [59–61]. Французький Кодекс вимагає проводити періодичні гідростатичні випробування з можливим одночасним використанням методу акустичної емісії, НК у випадку аварійної ситуації, використання зразків-свідків, моніторинг шумів та відстежування витоків теплоносія під час роботи реактора, а також моніторинг втоми металу [47]. Корпус реактора повинен періодично перевірятися у гарячій зоні, в ділянках всіх зварних швів, верхньої та нижньої накривки, патрубків, різьбових з'єднань та інших неоднорідностей. Вимога щодо гідростатичних випробувань за умов прикладання тиску, що на 33 % перевищує проектний перед введенням реактора в експлуатацію, та періодичних випробувань тиском, що на 20 % перевищує проектний, є ключовою відмінністю французького Кодексу. При цьому рекомендується використовувати низку методів НК, таких як ультразвукова дефектоскопія під водою, радіографічний, візуальний, телевізуальний під водою, контроль проникаючими речовинами, акустико-емісійний та вихрострумний.

В Індії також інтенсивно ведуть пошуки підходів до впровадження методів НК на АЕС, у тому числі і на реакторах АЕС нового покоління, включаючи реактори на важкій воді (advanced heavy water reactor – AHWR) та реактори на швидких нейтронах (prototype fast breeder reactor – PFBR) [1]. Для корпусних реакторів (BWR і PWR) особливу увагу приділяють таким новим підходам, як застосування УЗ фазованих імітаторів та техніки УЗ напрямлених хвиль, методів УЗ візуалізації, акустичної емісії, шумів Баркгаузена, вихростру-



мового, нейтронної радіографії тощо. Акустичні методи НК також є перспективними для оцінювання ступеня деградування, оскільки такі два параметри як швидкість поширення пружної хвилі та коефіцієнт її згасання залежать від мікроструктурного стану металу [1].

Сучасні аспекти НК корпусів реакторів. Із поживленням активності у сфері ядерної енергетики, спрямованої на верифікацію рівнів безпеки діючих АЕС у світлі нових даних про катастрофу на АЕС Фукусіма 1, та на створення реакторів четвертого покоління не останнє місце займають питання встановлення ступеня дефектності обладнання першого контуру, зокрема корпусу ядерного реактора. НК призначений для використання спеціалістами відповідної кваліфікації з метою оцінювання цілісності обладнання, що працює під тиском. У Кодексі ASME розділ V відведений питанням НК для виявлення як внутрішніх, так і поверхневих дефектів чи неоднорідностей. У підрозділі А цього розділу перераховано такі методи НК: радіографічний, ультразвуковий, проникаючих рідин, магнітопорошковий, вихрострумний, візуальний, витоків та акустико-емісійний. У підрозділі В перераховані всі ASTM стандарти, що стосуються вищезгаданих методів контролю [62].

Традиційно технічне діагностування на таких об'єктах, як ядерні реактори, підлягає системі правил «якщо–то», сформульованим у відповідних нормативних документах. Такі системи правил привабливі тим, що вони здатні ефективно унормовувати процедури експлуатування на підставі досвіду прийнятих інженерних рішень. Такі системи мають, звичайно, свої недоліки [63]. Зокрема, для того, щоб додати до існуючого переліку нову норму, її слід порівняти з усіма існуючими нормами задля уникнення несумісності чи протиріч, наприклад, коли один симптом відображає різні категорії дефектності чи руйнування. Із розширенням списку правил «якщо–то», себто кількості можливих сценаріїв, управління процесом ускладнюється. Оскільки ж правила не завжди засновані на глибокому розумінні протікаючих фізичних процесів, то така нормативна структура може стати нефункціональною, коли виникають нові обставини, які не можна ввести у чергове «якщо–то» правило, не порушивши хоча б одне із правил існуючих. На допомогу приходить підхід менш категоричний у своїх формулюваннях, тобто такий, що зберігає певний ступінь непевності у правилах і нормах. У такому разі системи діагностування повинні опиратися на певні алгоритми із використанням досвіду роботи (пошкоджень, аварій, відмов), якісних і кількісних моделей. Розроблення таких алгоритмів триває вже не одне десятиріччя [64–68].

Застосовуючи згадані алгоритмічні підходи до енергогенеруючого обладнання, EPRI створив систему даних під назвою Діагностичний порадишник. Діагностування пасивних компонентів (до яких відноситься і корпус ядерного реактора), себто таких, що не містять рухомих частин і приводів, полягає насамперед у виділенні сигналу, отриманого системою НК, із наступним встановленням відповіді на питання, чи виділений сигнал несе інформацію про пошкодження матеріалу. Якщо так, то оцінюється небезпека, спричинена пошкодженням (тут ідеться про локацію, розмір і форму пошкодження) [68].

Діагностування дефектів у корпусах діючих ядерних реакторів здійснюють, як зазначено вище, шляхом постобробки даних, отриманих від планових процедур НК. Останнім часом все більше зусиль прикладають до автоматизації процесу обробки даних із застосуванням калібраційних стандартів та кореляційних залежностей між параметрами сигналів і фізичними властивостями матеріалів.

На АЕС Borselle у Нідерландах ще у 1974 р. було встановлено особливу систему контролю реактора, яка відстежує стан його енергоблоку. У 1982 р. цю систему було модернізовано опцією статистичної обробки даних, які реєструються численними первинними перетворювачами. Серед інших ця система містила модуль, що здійснює моніторинг акустичних шумів, включно з вібраціями першого контуру, у тому числі і вібраціями у гарячій зоні реактора. У 2001 р. на цій АЕС було впроваджено нову систему онлайн-моніторингу, що містила дві підсистеми: 96-канальну підсистему на перетворювачах постійного струму для відстежування зміни експлуатаційних параметрів та перехідних процесів в енергоблоці та 32-канальну підсистему моніторингу шумів реактора. Використовуючи банк даних онлайн-моніторингу, були розроблені нові методики діагностування елементів енергоблоку [68–71].

Серед розробників обладнання для НК та моніторингу цілісності обладнання АЕС слід відзначити фірму AREVA, яка відома ще від початку 1980-х років, коли на замовлення німецького управління ядерною енергетикою була створена система моніторингу втомки FAMOS. За її допомогою було встановлено, що експлуатаційні температурні режими обладнання АЕС відрізняються від проектних. Це спонукало встановити системи FAMOS на 20-ти АЕС Німеччини. Система FAMOS на підставі онлайн-даних про теплове навантаження реактора розраховує параметри термічної втомки відповідальних елементів енергоблоку. Крім цього, фірма AREVA розробляє системи контролю ядерних енергоблоків. Прикладом сучасної розробки системи онлайн-моніторингу



є 256-ти канална система для легководного реактора третього покоління типу EPR (European Pressurized Reactor) на АЕС Olkiluoto, що споруджується у Фінляндії. Подібні системи розробляються для АЕС Flamanville 3 у Франції та для АЕС Taishan 1 і 2 у Китаї [68].

У контексті виявлення та оцінювання форми і розміру дефектів корпусних реакторних сталей, крім прямих методів технічного діагностування, впроваджують ітераційні методи із залученням відповідного моделювання. Використовують два класи прямих моделей: числові (наприклад, моделі скінченних елементів чи інтегральних рівнянь) та нейромереж. Запропоновано також неітераційні інверсні процедури, що включають томографічну реконструкцію, методики точкового джерела, лінійної проби. Ці методи не рекурсивні, тобто вони призначені для розв'язання інверсної проблеми використанням усіх наявних даних, що вимагає тривалих розрахунків.

Алгоритми зрощування даних (data fusion algorithms) для інверсних проблем в ділянці НК зазвичай використовують для прямих розв'язків. Це, наприклад, фільтрування Кальмана, техніка евідентного міркування Демпстера–Шафера, нейромережі та інші методи. Крім цього, пропонують вейвлетні перетворення, незалежний компонентний аналіз, деконволютивні, статистичні методи тощо.

Важливим питанням, що стосується НК пасивних компонентів АЕС (у тому числі і корпусів реакторів) є концепція надійності вимірювань. Це значить, що виявлення і оцінювання параметрів матеріалу залежить від таких чинників, як неінформативні шуми, мікроструктура матеріалу, стан поверхні, доступ, людський фактор. Для ранжування різних методів НК за надійністю ввели параметри ймовірності виявлення (probability of detection – POD) дефекту певного розміру, ймовірності помилкового «дзвінка», границі конфіденційності. Всі ці ймовірнісні параметри кодифіковано у Кодексі ASME [4, 72].

Старіння діючого на АЕС обладнання, особливо елементів першого контуру, що працюють в умовах високих температур, тисків та радіаційного опромінення, поставило питання системного підходу до моніторингу, контролю, оцінювання, прогнозування та прийняття рішень. Підходи до активного управління процесами деградації старіючого обладнання на АЕС були систематизовані та сформульовані, як «Proactive management of ageing degradation», що було представлено на з'їзді ASME у 2010 р. Йдеться про таке управління, яке вимагає впровадження на діючих легководяних ядерних енергоблоках новітніх методів технічного діагностування, онлайн-моніторингу та прогностичних методів. Це повинно було б

забезпечити своєчасне виявлення зміни фізичного стану матеріалу внаслідок процесів старіння включно з фіксуванням ранніх стадій розвитку руйнування. Дані вимірювань, отримані від систем моніторингу, повинні б оброблятися для використання у прогностичних системах [73].

Існує чотири напрями, де необхідно впровадити такі системи управління [73]:

- моніторинг великих тріщиноподібних дефектів;
- моніторинг ранніх стадій зародження тріщин;
- моніторинг деградування кабелів;
- моніторинг стану бетонної герметичної оболонки.

Серед перерахованих лише перші дві системи моніторингу стосуються корпусу ядерного реактора. Для ефективної роботи такої системи управління слід забезпечити високу достовірність оцінок механізмів деградування задля правильного вибору прогностичної моделі, а відтак правильних прогнозів щодо динаміки деградування та ризиків, які з ним пов'язані. До методів НК, які є кандидатами для виявлення та оцінювання великих тріщиноподібних дефектів у металевих конструкціях, зараховують акустичну емісію, направлені ультразвукові хвилі (guided ultrasonic waves), розсіяні ультразвукові поля (diffuse ultrasonic wave fields), ультразвуковий контроль фазованим рядом (phased array ultrasonic testing) та вихрострумний метод [73].

Системи активного управління мають бути більш точними, ніж існуючі системи періодичного контролю. Для цього вони повинні включати такі три складові: виявлення ранніх стадій деградування, онлайн-моніторинг та прогностичну систему оцінки залишкового ресурсу. Деградування матеріалу можна умовно розділити на чотири етапи: створення передумов для зародження мікротріщин; виникнення мікротріщин; ріст і злиття мікротріщин; ріст макротріщин. Існуючі сьогодні процедури періодичного контролю цілісності корпусів ядерних реакторів передбачають лише контроль четвертого етапу деградування матеріалу. Для виявлення перших трьох етапів необхідне впровадження інших, чутливіших підходів. До них можна віднести мікромагнітні методи магнітоакустичної емісії та шумів Баркгаузена, які дозволяють відстежувати поступові зміни властивостей матеріалу за змінами його електромагнітних характеристик матеріалу [73].

Здатність виявляти ранні стадії деградування матеріалу ще на першому етапі, тобто перед зародженням мікротріщини, матиме велике значення для створення систем активного управління процесами деградування. Насамперед це уможливить відстежувати майже весь процес деградування ме-



талу (а не лише його кінцевий етап) та підвищувати імовірність виявлення дефекту POD. По-друге, раннє виявлення передумов для зародження мікротріщин допоможе підвищити точність прогностичних розрахунків. По-третє, для експлуатаційників залишиться більше часу, а це уможливить більш адекватне реагування на виявлений в обладнанні дефект [73].

Наступною важливою складовою нової системи управління є онлайн-моніторинг цілісності обладнання. Існуюча сьогодні практика полягає у періодичному контролі елементів обладнання під час планових відключень, що пов'язані із циклом паливних елементів і тривають 18–24 місяці. Оскільки цикл вигорання палива суттєво скоротити неможливо, виникає потреба онлайн-моніторингу цілісності обладнання під час роботи енергоблоку. Безсумнівною перевагою такого моніторингу є суттєве зростання імовірності виявлення дефекту POD та підвищення достовірності прогностичних розрахунків, хоч очевидно, що робота діагностичного обладнання в умовах постійно діючих високих температур, тисків і радіації є суттєво складніша, порівняно з умовами періодичного контролю. Більше того, моніторинг діючого обладнання повинен здійснюватись дистанційно, в автоматизованому режимі, за відсутності людей у безпосередній близькості до діагностованого обладнання [73].

Важливе місце в новій системі управління процесами деградування посідатиме її прогностична складова, що безпосередньо пов'язана із прийняттям рішень щодо безпеки експлуатування АЕС, а відтак щодо виробництва електроенергії та втрат на простоювання та ремонти. Прогностичні алгоритми можна умовно розділити на три типи. Перший, заснований на надійності, використовує експлуатаційні дані щодо пошкодження, старіння, відмов та руйнування обладнання АЕС. Другий уможливляє прогнози на підставі експлуатаційних параметрів навантаження енергоблоку. Третій тип прогнозування використовує дані вимірювань фізичних параметрів старіючих матеріалів [73].

Оскільки галузь ядерної енергетики має чи не найрозвиненішу нормативну базу, впровадження нових методик є тут дуже складним. Орієнтуючись на нормативну базу США, національні нормативні документи різних країн несуттєво відрізняються у питаннях підходів до технічного діагностування відповідального обладнання АЕС. Що стосується пасивного обладнання ядерного енергоблоку, то орієнтиром і далі залишається Кодекс ASME для котлів та ємностей під тиском, в якому для моніторингу пасивних компонентів дозволяється використовувати виключно метод акустичної емісії і то лише за певних умов. Такі обставини не стимулюють впроваджувати цей метод у практику,

навіть з огляду на проблеми, які існують із впровадженням інших методів діагностування [68].

Стаття IWA-2000 Кодексу ASME класифікує методи НК для візуального, поверхневого та для об'ємного аналізів. До поверхневих методів належать магнітопорошковий, проникаючих рідин, вихрострумний та УЗ. До об'ємних методів належать радіографічний, УЗ, вихрострумний та акустичної емісії. Кодекс допускає використання інших методів, якщо вони продемонстрували свої переваги над зазначеними. Щодо методу акустичної емісії, то його успішно застосовують на промислових об'єктах контролю у поєднанні з гідростатичними випробуваннями та для експлуатаційного контролю ємностей і трубопроводів, що працюють під тиском. Із виявленням дефекту та встановленням його розташування в об'ємі металу постає питання про його «ідентифікацію», під якою розуміють як геометричні особливості, так і чинники, що спричинили виникнення чи розвиток дефекту. Кількість первинних перетворювачів, необхідних для перевірки об'єкту, зумовлена не стільки його розмірами, скільки складністю форми. Для ємності з простими геометричними формами може вистачити 12–15 первинних перетворювачів, тоді як ядерний енергоблок може потребувати 60–90 перетворювачів, якими мусять бути обладнані корпус реактора, головні циркуляційні помпи, парогенератор, компенсатор тиску, головні циркуляційні трубопроводи і клапани [62].

Значимість компонентів АЕС щодо їх впливу на рівень безпеки також класифікована. Найвищі вимоги висувають до обладнання першого контуру, яке безпосередньо контактує з теплоносієм реактора і яке відносять до класу 1. До обладнання класу 2, яке забезпечує відвід тепла від теплоносія першого контуру, а також того, що відповідає за включення аварійних систем захисту, чи устаткування класу 3 вимоги нижчі. Корпус ядерного реактора належить до класу 1 і є найбільшим за розміром його представником. Тому і вимоги до цього компоненту АЕС виняткові як на стадії виготовлення, так і під час експлуатування [73].

Для ранжування готовності до впровадження технологій (матеріалів, пристроїв, методів тощо) у США, а згодом у Євросоюзі, у виробничий процес було запроваджено так званий рівень технологічної готовності (technology readiness level – TRL), що визначається за 9-тибальною шкалою [73, 74]. Після пробного застосування методу акустичної емісії на першому реакторі АЕС Limerick та з огляду на наявність високоякісних акустико-емісійних систем на ринку обладнання для НК, цей метод був класифікований як TRL 8–9 для моніторингу росту тріщин у корпусах обладнання першого контуру реакторів типу PWR [73]. TRL 8 означає, що технологія перевірена на пред-



мет працездатності у своєму остаточному вигляді в умовах, що відповідають експлуатаційним. Цей рівень означає кінець розробки технології. До TRL 9 відносять технології, які у своєму остаточному вигляді були використані для призначеної мети на діючих об'єктах. Отже, метод акустичної емісії, перейшовши всі етапи становлення, досягнув рівня готовності до впровадження на ядерних енергоблоках. Це стосується не стільки діючих АЕС, де акустико-емісійний контроль не передбачений, скільки для нових проектів, де можна закласти розміщення таких систем моніторингу.

На думку експертів Північнозахідної атлантичної національної лабораторії (Passific Northwestern National Laboratory – PNNL) у США метод безперервного акустико-емісійного моніторингу обладнання ядерних енергоблоків міг би повністю замінити існуючу сьогодні систему періодичного діагностування елементів обладнання за допомогою інших методів НК [73]. Така система контролю цілісності обладнання першого контуру могла би працювати лише за умов високонадійного рестрування актів зародження та поширення тріщин. Для цього ще слід розробити високоефективні алгоритми виокремлення інформативної складової сигналів акустичної емісії та забезпечити вимірювальні системи первинними перетворювачами, здатними безвідмовно працювати впродовж десятиріч в умовах високих температур, радіаційного опромінення та можливого агресивного впливу навколишнього середовища.

Розширення спектру методів НК обладнання ядерних реакторів із додаванням опції онлайн-моніторингу цілісності корпусу реактора за допомогою методу акустичної емісії повинно сприяти підвищенню рівня безпеки експлуатування АЕС. Одночасно потрібно спрямувати зусилля на розвиток систем діагностування і моніторингу цілісності елементів ядерних енергоблоків, включно з компонентами ядерних реакторів, розташованими всередині корпусу. Зокрема, гостро стоїть потреба розробки первинних перетворювачів, стійких до середовища гарячої зони реактора (підвищені температура і тиск, радіаційне опромінення, агресивне середовище, тобто вода та продукти її радіолізу). Існуючі п'єзокерамічні перетворювачі не відповідають цим вимогам. Відеокамери візуального контролю теж не витримують більше, ніж кілька годин праці в умовах інтенсивної радіації. Не менш важливою є проблема передавання даних вимірювання назовні корпусу реактора без зниження надійності всього об'єкту [68].

Ще одним актуальним питанням, що сьогодні турбує розробників систем технічного контролю та діагностування пасивних елементів ядерних енергоблоків, є розміщення первинних перетворювачів. З огляду на розміри та особливості гео-

метрії корпусів ядерних реакторів, а також урахувуючи значне згасання акустичних хвиль у високочастотній області, кількість первинних перетворювачів акустичної емісії, необхідних для 100 % моніторингу корпусу реактора може бути доволі значним. Оскільки застосування цього методу сьогодні регламентується тільки за умов використання іншого методу НК, повний моніторинг корпусів діючих реакторів виглядає досить проблематичним. Не маючи змоги провадити 100 % діагностику цілісності корпусів, актуальними стають кількісне моделювання ризиків та прогностичне моделювання роботоздатності компонентів енергоблоку та АЕС в цілому [68].

Розвиток методів НК корпусів реакторів ВВЕР. НК корпусів реакторів типу ВВЕР у колишньому СРСР підлягав існуючій нормативній базі [75, 76] і передбачав гідростатичні випробування та візуальний контроль, застосування проникаючих речовин, магнітопорошкового, УЗ і вихрострумового методів на етапі виготовлення корпусу. Сьогодні у державах, де працюють реактори типу ВВЕР, відпрацьовують індивідуальні підходи, які адаптуються до міжнародних нормативних документів та сучасних розробок до діагностування корпусів ядерних реакторів. Зауважимо, що питання безпеки експлуатації ядерних реакторів виходить далеко за межі окремих держав і перебуває під пильною увагою міжнародної спільноти. Тому і підходи до діагностування та вимог безпеки у різних країнах світу є досить подібними.

Для реакторів типу ВВЕР–1000, відповідно до міжнародної практики щодо реакторів типу PWR, передбачено використання зразків-свідків типу Шарпі, причому передбачається 6 термінів огляду. Для кожного терміну передбачено по одному комплекту зразків радіаційного старіння і по одному комплекту зразків теплового старіння [77, 78].

Подібні нормативні вимоги існують у Російській Федерації, Україні, Чехії, Угорщині, Словаччині, де працюють реактори цього типу. На деяких реакторах використовують спеціальні екрани для проведення візуального огляду внутрішньої поверхні корпусу реактора та її контролю проникаючими речовинами. За підтримки Євросоюзу у країнах, де працюють реактори типу ВВЕР, впродовж останнього десятиріччя проводиться робота з уніфікації процедур розрахунку ресурсу ядерних реакторів типу ВВЕР та залучення нових підходів до прогнозування ресурсу корпусних реакторних сталей, у тому числі використання майстер-кривої (програма VERLIFE) [79, 80]. Крім цього, в Російській Федерації тривають пошуки нових методів НК корпусів ядерних реакторів. Наприклад, на Волгодонській АЕС випробувано так званий магнітотвердометричний контроль на основі спіль-



ного використання методів кінетичної твердості та магнітного [81]. Хоча такий контроль не є самостійним, а використовується як доповнення до випробувань зразків-свідків, все ж його застосування є дуже важливим з огляду на недостатню комплектацію зразками-свідками деяких діючих реакторів типу ВВЕР.

Цікавим є також досвід Фінляндії, де на АЕС Ловііса від 1977 та 1980 рр. працює два реактори ВВЕР-440/В-213, корпуси яких виготовлені зі сталі 15Х2МФА. Щоб привести роботу АЕС у відповідність до сучасних вимог ядерної безпеки, на станції було встановлено обладнання виробництва фірм «Westinghouse» та «Siemens». Задля ефективного узгодження технічних характеристик цього обладнання та ядерного реактора, спроектованого в колишньому СРСР, було реалізовано проект, що отримав назву «Eastinghouse» [82]. У 1996 р. корпуси реакторів піддали термообробці відпалом задля зменшення ступеня радіаційного окрихчення, зумовленого низькою якістю металу. Це дозволило продовжити термін експлуатування цих двох реакторів до 2027 і 2030 рр., відповідно. На АЕС Ловііса надійність методів НК, які використовують під час роботи реактора, досліджували в рамках кількох європейських програм [72, 83, 84]. Для цих випробувань використовували УЗ первинні перетворювачі, детектори витоку та інше обладнання для УЗ дефектоскопії, а їх процедура відповідає Кодексу ASME, який і сьогодні слугує універсальним стандартом у всьому світі [4, 72]. Для виявлення та оцінювання параметрів дефектів використовували кілька різних методик УЗ діагностування: фокусування, конверсії моди УЗ хвилі, відтінювання та нормального удару поздовжньої хвилі. Крім того, аналізували дієвість інших методів НК: акустичної голографії, електромагнітних акустичних перетворювачів (electromagnetic acoustic transducers – EMAT), часу протікання дифракції (time of flight diffraction – TOFD).

В Інституті ядерних досліджень Чеської Республіки проводять постійне відстежування нових тенденцій НК обладнання першого контуру реакторів типу ВВЕР [85]. До сфери застосування НК, яким приділяють найбільше уваги, належать: перевірка стикових зварних з'єднань за допомогою дифракційно-часового методу TOFD; контроль поздовжніх аустенітних швів у вигинах імпульсним луно-методом; контроль колових зварних з'єднань та поздовжніх з'єднань зігнутих ділянок методом фазованих решіток. Тобто головну увагу тут приділяють УЗ методам діагностування.

У Російській Федерації на об'єднанні «НИКИМТ-Атомстрой» (НИКИМТ – Науково-дослідний і конструкторський інститут монтажно-технології) створюють оптичні телевізійні систе-

ми СТС-К-78П у радіаційно-стійкому виконанні для сканування контрольованої поверхні корпусу реактора з високою швидкістю і вимірювання виявлених відхилень з метрологічно-атестованою точністю. Відповідна система призначена для автоматизованого передексплуатаційного та експлуатаційного контролю основного металу, наплавленого покриття і зварних з'єднань у середині корпусу реакторів типу ВВЕР. Вона повністю задовольняє вимогам російських нормативних документів на візуальний контроль ПН АЕ Г-7-016-89 і РД-ЕО-0079-2005. За допомогою СТС-К-78П у наплавленому металі корпусів реакторів на АЕС Російської Федерації, Фінляндії та України виявлено більше ніж 50 дефектів, які не вдавалось виявити за допомогою інших засобів контролю [44, 86].

У 1998–2002 рр. системи типу СК187 для контролю корпусів реакторів були істотно модернізовані. До основних систем контролю, розроблених НИКИМТ, належать:

СК27 – система контролю корпусу реактора і внутрішньої поверхні шахти;

СК54 – система контролю СКУ з боку зовнішньої поверхні;

СК187 – підсистема контролю корпусу реактора;

СК33 – автоматизований комплекс для ультразвукового та вихрострумового контролю шпильок корпусу [44].

Система СК27 контролю корпусу реактора і внутрішньої поверхні шахти призначена для проведення [87]:

– періодичного телевізійного візуального контролю (ТБК) стану аустенітної наплавки внутрішньої циліндричної поверхні корпусу і його дна, радіусних переходів від циліндричної поверхні корпусу до патрубків головних циркуляційних трубопроводів (ГЦТ), внутрішньої поверхні патрубків ГЦТ, внутрішньої поверхні внутрішньокорпусної шахти з метою виявлення дефектів і визначення координат їх розташування, видачі протоколу результатів контролю та архівації відеоданих;

– періодичного УЗ контролю зварних швів і металу навколошовних зон, радіусних переходів циліндричної поверхні корпусів до патрубків ГЦТ, контролю з визначенням координат виявлених неоднорідностей, опрацювання отриманих даних з видачею протоколів результатів контролю та їх архівацією.

Телевізійний контроль та УЗ діагностику системою СК27 проводять всередині корпусу реактора, заповненого водою з параметрами теплоносія. Зауважимо, що подібну систему контролю розроблено хорватськими спеціалістами [88]. Вона поєднує в собі УЗ фазованого ряду, вихрострумовий



та візуальний методи обстежень і призначена для ретельної перевірки внутрішньої поверхні корпусу реактора ВВЕР-1000 в умовах, коли корпус реактора заповнено водою. Чутливість вихрострумового обладнання дозволяє виявляти поверхневі тріщини довжиною 3 мм і шириною 1...10 мкм.

Підсистема СК187 зовнішнього контролю корпусу призначена для:

- періодичного УЗ контролю зварних швів № 1, 7 з боку зовнішньої поверхні, основного металу циліндричної частини корпусу і дна з визначенням координат неоднорідностей, опрацюванням та архівацією результатів контролю і видачею протоколу;

- періодичного телевізійного візуального контролю стану зовнішньої циліндричної поверхні корпусу і дна реактора з метою виявлення та визначення координат розташування відхилень (подряпин, тріщин) та архівації відеозображень [89].

Згідно з технічними характеристиками система СК187 може працювати за температури навколишнього повітря не вище 30 °С та температури корпусу реактора не вище 60 °С. Для акустичного контакту використовують воду, що містить інгібітор корозії. З огляду на технічні характеристики, таку систему можна застосовувати в ході ремонтної кампанії, як це недавно було зроблено на першому енергоблоці Південноукраїнської АЕС [90]. Системи СК187 були запроваджені на всіх АЕС України, а також на енергоблоках типу ВВЕР у Фінляндії (Loviisa – 2 реактори ВВЕР-440), Угорщині (Paks – 4 реактори ВВЕР-440), Словаччині (Bohunice V2 – 2 реактори ВВЕР-440), Чеській Республіці (Dukovany – 4 реактори ВВЕР-440), Німеччині (Greifswald – 5 реакторів ВВЕР-440, виведені з експлуатації у 1990 р.) та в Болгарії (Козлодуй – 5-й блок ВВЕР-1000). При цьому версія системи контролю для реакторів ВВЕР-440 називається УСК-213 відповідно до модифікації реактора (ВВЕР-440/В-213).

Система СК187 може функціонувати з підсистемами 01 (СК-187.01) – для зовнішнього телевізійного і УЗ контролю циліндричної частини корпусу і дна; 02 – УЗ контролю зварних швів корпусу в зоні патрубків і основного металу головних патрубків та основного металу патрубків системи аварійного охолодження і захисту та їхніх зварних швів. Модифікацію СК-187.04 розробили для внутрішнього УЗ і телевізійного контролю корпусу реактора і впровадили на Нововоронезькій АЕС у Російській Федерації.

Крім згаданих вище систем контролю, розроблених у Російській Федерації, для корпусів реакторів ВВЕР (серій як 440, так і 1000) використовують автоматизовані системи SAPHIR фірми «Siemens», відомою, зокрема, своїми розробками

корпусів ядерних реакторів [49]. Система SAPHIR (Siemens ALOK Phased Array Integrated Reliable) є поєднанням УЗ діагностування за принципом фазованого ряду та маніпуляторів і роботів для проведення відповідного діагностування. Таку систему можна ефективно використовувати як на реакторах типу PWR, так і BWR. Її успішно впровадили на корпусах реакторів, виготовлених такими фірмами як «Framatome», «Westinghouse» та «Babcock&Wilcox». За допомогою цієї системи тривалість обстеження одного блоку зменшилася вдвічі. Оснащена самодіагностичним модулем ця система відзначалась винятковою надійністю експлуатування. Вона з'явилась на ринку в Німеччині у 1996 р. Після цього її зразки були виготовлені для Угорщини, Словаччини, України та Російської Федерації для діагностування корпусів реакторів типу ВВЕР [91–93].

НК корпусів реакторів ВВЕР в Україні.

Створення та впровадження нових методів діагностики та контролю основного металу та зварних з'єднань корпусів реакторів типу ВВЕР, обладнання і трубопроводів АЕС має велике значення для безпеки України. Провідною науковою інституцією, яка займається цими питаннями в Україні, є Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут» (ННЦ ХФТІ) НАН України. Колектив цього інституту розробив методики для контролю механічних властивостей та структури металу головних циркуляційних трубопроводів, виявлення експлуатаційних дефектів у теплообмінних трубках парогенераторів, виявлення тріщин в зоні зварного з'єднання «гарячого» колектора до корпусу парогенератора. Не минули розробки науковців і корпусних сталей. Для контролю напружено-деформованого стану корпусу ВВЕР-1000 запропоновано застосування магнітних методів. Для їх впровадження на АЕС України виконано комплекс науково-дослідних робіт та дослідно-конструкторських розробок. Проведено діагностичний контроль напружено-деформованого стану шести корпусів реакторів Запорізької та Південно-Української АЕС. Виявлено найкритичніші точки, що вимагають постійного контролю, оскільки вони найсприятливіші до зародження і розвитку дефектів в умовах експлуатування [94].

У ході планово-попереджувального ремонту на другому енергоблоці Південно-Української АЕС було проведено ресурсне обстеження обладнання та контроль корпусу реактора зсередини за допомогою УЗ обладнання зі щогловим маніпулятором. Це обладнання привезли з Рівненської АЕС, а процедуру обстеження, яка тривала 18 діб, виконували ліцензовані фахівці Рівненської АЕС. Контроль корпусу реактора зовні фахівці Південно-Української АЕС виконують са-



мостійно, маючи для цього необхідне обладнання. У 2009 р. обстеження корпусу реактора зсередини було виконано на першому енергоблоці [95].

Оцінка механічних властивостей зварних з'єднань конструкцій проводиться на зразках, виконаних із застосуванням тих самих зварювальних матеріалів і з повним відтворенням натурної товщини зварюваних заготовок, типу обробки, режимів і методів зварювання. Такі випробування, однак, не враховують можливості існування дефектів металу. Тому програми контролю якості деталей і зварних з'єднань навіть під час проведення ретельної інспекції різними методами обов'язково виходять із наявності дефектів певних розмірів. Допускаються, наприклад, шлакові включення у зварних швах, що є тріщиноподібними дефектами. Що більше, навіть дуже ретельний контроль не може дати абсолютної гарантії відсутності дефектів, які мають розміри більші, ніж дозволено. Це пояснюється не тільки можливіми суб'єктивними помилками під час проведення контролю, але й об'єктивними умовами. Так, просвічування та УЗ контроль може не виявити несприятливо орієнтовані і слабо розкриті тріщини, особливо тріщини у підповерхневому шарі. Тому НК відповідальних конструкцій – наприклад, зварних корпусів реакторів – проводять в обсязі 100 % із паралельним застосуванням просвічування, УЗ та поверхневої дефектоскопії. Проте слід орієнтуватися на те, що окремі дефекти, які перевищують за розмірами встановлені норми, і зокрема тріщини, все ж не будуть виявлені. Тому слід говорити лише про більшу чи меншу ймовірність виявлення тріщиноподібних дефектів певних розмірів. Виходячи з технічних можливостей методів НК та досвіду виготовлення реакторних конструкцій, можна вважати, що в якості граничного вихідного гіпотетичного дефекту з достатньою надійністю можна прийняти протяжну тріщину глибиною близько 7 мм. Можливі й песимістичніші припущення щодо розмірів вихідних дефектів. Практично неймовірною ситуацією є існування в корпусі реактора тріщини глибиною, що дорівнює чверті товщини стінки (~50 мм). При цьому передбачається, що тріщина 10-кратного розміру не повинна викликати крихкого руйнування контрольованого виробу [4, 96].

Можливість існування тріщиноподібних дефектів вимагає проведення відповідних оцінок міцності матеріалу. Це особливо необхідно, коли матеріал працює під дією циклічних навантажень, а також в умовах окрихчування. Розроблений на даний час апарат механіки руйнування (лінійної і нелінійної) дає можливості для відповідних кількісних оцінок та прийняття технічних рішень про допустимість експлуатації без проведення ремонту випадково пропущених дефектів. Разом з тим

для відповідальних конструкцій необхідні не тільки суворий контроль під час виготовлення, а й дефектоскопія під час експлуатації. Періодичний контроль різними методами, зокрема ультразвуком, повинен забезпечити додаткові гарантії відсутності небезпечних дефектів, як вихідних, так і таких, що виникли за екстремальних умов експлуатації. Ретельній періодичній перевірці підлягають найнапруженіші ділянки корпусу реактора, наприклад, зона патрубків [96].

Оцінку міцності і ресурсу роботи елементів обладнання АЕС проводять за фізико-механічними характеристиками матеріалів і розрахунковими схемами, які претендують на правильний опис умов тривалої експлуатації. Вибір таких схем представляє значні труднощі. У простішому випадку розрахункові схеми виходять із консервативних припущень, забезпечуючи значний запас міцності. Наприклад, запобігання крихкому руйнуванню ємностей під тиском згідно з такими схемами вимагає вибору мінімальної робочої температури, що перевищує зі значним запасом критичну температуру крихкості металу в найгірших ділянках зварних вузлів. Ця умова забезпечує гальмування тріщини, запобігає її нестабільному поширенню фактично незалежно від початкових розмірів тріщини. Тим самим гарантується відсутність небезпечного переходу до крихкого лавиноподібного руйнування корпусу реактора за умов утворення наскрізної тріщини [96].

Обзор посвящен анализу этапов развития метода акустической эмиссии для диагностирования состояния объектов ядерной энергетики. Показано, что методы неразрушающего контроля (НК) играют чрезвычайно важную роль в обеспечении безаварийной работы корпусов реакторов АЭС. Их внедрение на этапе изготовления и эксплуатации ядерных реакторов претерпело существенное развитие в течение нескольких десятилетий. Первое упоминание об этом датируется 1958 г., когда состоялся симпозиум по применению методов НК в ядерной энергетике. На нем отмечено применение радиографического метода и подчеркнута необходимость использования других методов НК для полной проверки качества корпусов ядерных реакторов. Впоследствии появился Кодекс нормативов для котлов и сосудов, работающих под давлением, разработанный Американским обществом инженеров, один из разделов которого был посвящен формулировке минимальных требований к изготовлению емкостей и охватывал визуальную проверку и диагностирование целостности корпуса с помощью стандартизированных методов НК, таких как магнитопорошкового, проникающих жидкостей, радиографии, ультразвуковой дефектоскопии и вихретокового.



Особое внимание на этапе изготовления корпуса реактора уделяли сварным соединениям. Как показано в обзоре, на основании анализа литературных источников, во всех ведущих странах мира продолжает развиваться ядерная энергетика, а вместе с ней и применение методов НК, в том числе и акустической эмиссии. Под это подведена соответствующая нормативная база, позволяющая поставить НК на промышленный уровень и избежать противоречий в толковании результатов диагностирования. Показана важность работ, проведенных отечественными и зарубежными специалистами относительно оценки состояния корпусов реакторов ВВЭР и описаны соответствующие средства, используемые с этой целью.

1. Kumar V. Role of non-destructive examination in nuclear industry // Reactor Technology and Eng. / Ed. by R. K. Sinha. – Mumbai: Bhabha Atomic Research Centre, 2006–2007. – Ch. 17 – P. 243–249.
2. McGonagle W. J. Introduction // Symposium on Nondestructive tests in the field of nuclear energy. ASTM STP223-EB. – Baltimore: ASTM. – 1958. – P. 1–12.
3. McGonagle W. J. Quality control and nondestructive testing in reactor pressure vessel fabrication // Nuclear Structural Eng. – 1965. – 2. – P. 293–300.
4. Criteria for design of elevated temperature class 1 components // ASME Boiler and Pressure Vessel Code. Section III, Division 1, Vol. 10. – New York: ASME, 1976. – 84 p.
5. ASTM E109–63(1976). Method for dry powder magnetic particle inspection / Replaced by ASTM E709–08. Standard guide for magnetic particle testing. – West Conshohocken: ASTM International. – 2008. – DOI: 10.1520/E0709-08. – 41 p.
6. ASTM E138–63(1976). Method for wet magnetic particle inspection / Replaced by ASTM E709–08 Standard guide for magnetic particle testing. – West Conshohocken: ASTM International. – 2008. – DOI: 10.1520/E0709-08. – 41 p.
7. ASTM E125–63(2008). Standard reference photographs for magnetic particle indications on ferrous castings. – West Conshohocken: ASTM International, 2008. – DOI: 10.1520/E0125-63R08. – 3 p.
8. ASTM A275/A275M–08. Standard practice for magnetic particle examination of steel forgings. – West Conshohocken: ASTM International, 2008. – DOI: 10.1520/A0275_A0275M-08. – 7 p.
9. ASTM E165–12. Standard practice for liquid penetrant examination for general industry. – West Conshohocken: ASTM International, 2008. – DOI: 10.1520/E0165_E0165M-12. – 18 p.
10. ASTM E52–49. Terminology of industrial radiographic for use in radiographic inspection of castings and weldments [Электронный ресурс]. – West Conshohocken: ASTM International, Withdrawn, 1969. – Режим доступа: <http://www.astm.org>.
11. ASTM E 94–04(2010). Standard guide for radiographic examination [First published 1952]. – West Conshohocken: ASTM International. – DOI: 10.1520/E0094-04R10. – 2010. – 13 p.
12. ASTM E99–63. Reference radiographs for steel welds / 1973 replaced with ASTM E390–11 Standard reference radiographs for steel fusion welds. – West Conshohocken: ASTM International, 2011. – DOI: 10.1520/E0390-11. – 4 p.
13. ASTM E142–92. Method for controlling quality of radiographic testing / 2000 replaced with ASTM E94–04(2010). Standard guide for radiographic examination. – West Conshohocken: ASTM Internat. – 2011. – DOI: 10.1520/E0094-04R10. – 13 p.
14. ASTM E113–67 (1974). Recommended practice for ultrasonic testing by the resonance method / 1981 withdrawn with no replacement [Электронный ресурс]. – West Conshohocken: ASTM Internat. – Режим доступа: <http://www.astm.org/Standards/E113.htm>.
15. ASTM E114–10. Standard practice for ultrasonic pulse-echo straight beam contact testing. – West Conshohocken: ASTM Internat. – 2010. – DOI: 10.1520/E0114-10. – 5 p.
16. ASTM E164–08. Standard practice for contact ultrasonic testing of weldments. – West Conshohocken: ASTM Internat. – 2008. – DOI: 10.1520/E0164-08. – 24 p.
17. ASTM E 309–11. Standard practice for Eddy-current examination of steel tubular products using magnetic saturation [First edition 1966]. – West Conshohocken: ASTM Internat. – DOI: 10.1520/E0309-11. – 2011. – 5 p.
18. Weymueller C. R. Inspecting welds in pressure vessels for nuclear systems // Welding Design in Fabrication. – 1978. – 51, № 3. – P. 95–97.
19. Dickinson F. S., Watkins B. Cracking in welded joints. Occurrence and prevention in nuclear plant. I // Welding and Metal Fabrication. – 1973. – 41, № 9. – P. 329–335.
20. Dickinson F. S., Watkins B. Cracking in welded joints. Occurrence and prevention in nuclear plant. II // Ibid. – 1973. – 41, № 10. – P. 346–352.
21. Crawford A. H. Non-destructive testing of nuclear power reactor components // Non-Destructive Testing. – 1970. – 3. – P. 217–219.
22. Proceedings of the International Symposium on Non-destructive testing of nuclear power reactor components, Rotterdam, 26–27 Feb. 1970. – Netherlands: Atoomforum, 1970. – 41 p.
23. Rules for in-service inspection of nuclear power plant components, Section XI / ASME Boiler and Pressure Vessel Code. – New York: ASME. – 2012. – 574 p.
24. Decade of pre- and inservice examination experience / C. E. Lautzenheiser, W. T. Flach, E. R. Reinhart, S. A. Wenk // Proceedings of the American Society of Mechanical Engineers winter annual meeting, 11–15 Nov. 1973, Detroit. – New York: ASME, 1973. – 11 p.
25. Watkins B., Jackson H. B-scan presentation of ultrasonic results as applied to thick-walled pressure vessels // Proceedings of the 2nd Conference on Periodic inspection of pressurized components, June 4–6 1974; Institution of Mechanical Engineers. – London: Mechanical Engineering Publications, 1975. – P. 79–91.
26. Reactor vessel in-service inspection assembly US Patent 3809607 / Murray T. R., Burns D. C., filed Nov. 23, 1971, Int. Cl. G21e 17/00. – 10 p.
27. Pat. 3929007 US. Apparatus for carrying out ultrasonic inspection of pressure vessels / Dent K. H., Challenger R. S., published 12/30/1975, Int. Cl. G21C17/003; G01N29/04; G01N29/265; G21C17/01; G01N29/04; G01N29/26; G21C17/003; (IPC1-7): G01N29/04. – 6 p.
28. Pat. 3934457 US. Vessel nozzle inspection apparatus; Clark J. P., Smith T. D., Foster A. C. publ. 01/27/1976, Int. Cl. G01N29/04; G01N29/265; G01N29/28; G21C17/017; G01N29/04; G01N29/26; G01N29/28; G21C17/017; (IPC1-7): G01N29/04. – 10 p.
29. Sattler F. J., Forrer G. R., Parker W. O. Inservice Inspection of Nuclear Plants // Materials Evaluation. – 1972. – 30, № 11. – P. 18A–22A, 27A–29A.
30. Forrer G. R., Sattler F. J. State-of-the-art review of nondestructive testing as applied to nuclear pressure vessels and components // Ibid. – 1975. – 33, № 10. – P. 20A–23A, 25A–27A.
31. Reinhart E. R. EPRI program to improve nuclear code inspection methods // Ibid. – 1978. – 36, № 6. – P. 36–42.
32. Myoshi S. Inservice inspection of nuclear power station // Atsuryoku Gijutsu. – 1972. – 10, № 6. – P. 50–57.
33. Results of mock-up test on ultrasonic in-service inspection tool for nuclear reactor vessel / T. Yamaguchi, Y. Fukushima, M. Yamamoto et al. // Proceedings of the 2nd International Conference on Pressure vessel technology; 1–4 Oct. 1973, San Antonio, TX. – Vol. 2: Materials, fabrication, and inspection. – New York: ASME, 1973. – P. 685–699.
34. Ultrasonic B-scan inspection system for nuclear reactor pressure vessels using compound scanning / S. Sasaki, K.



- Kanda, M. Tadauchi et al. // Proceedings of the 2nd Conference on Periodic inspection of pressurized components, June 4–6 1974; Institution of Mechanical Engineers. – London: Mechanical Engineering Publications. – 1975. – P. 1–6.
35. Watkins B., Jackson H. Technique for inspection of light water reactor pressure vessels // Proc. Conf. Periodic inspection of pressure vessels, London, May 9–11 1972. – London: Institute of Mechanical Engineers. – 1973. – 274 p.
36. Watkins B. In-service inspection of the BR3 reactor in Mol // Non-Destructive Testing. – 1973. – 6. – P. 191–194.
37. Watkins B. Periodic inspection of light water reactor pressure vessels // British Journal of Non-Destructive Testing. – 1973. – 15. – P. 165–175.
38. Meyer H. -J. Aspects of in-service inspections on reactor pressure vessels in Germany // Materials Evaluation. – 1971. – 29, № 8. – P. 171–181.
39. Tenbusch T. Zerstörungsfreie Prüfung von Schweissnahten im Druckbehälterbau // Schweissen und Schneiden. – 1974. – 26, № 5 – S. 166–169.
40. Trumpfeller R. Requirements for in-service inspection of water-cooled reactor vessels by nondestructive testing methods in Germany // Proc. Conf. Periodic inspection of pressure vessels, May 9–11 1972; London / Institute of Mechanical Engineers in London. – 1974. – 26, № 5. – P. 166–169.
41. Kolb K., Woelfel M. Zur Ultraschallprüfung von Kernreaktor-Druckbehältern // Materialprüfung. – 1975. – 17, № 10. – S. 352–358.
42. Seifert W. Einrichtungen (Manipulatoren) Insbesondere fuer Ultraschall-Prüfungen in Kernkraftwerken – Entwicklungsstand, Einsatz und Betriebserfahrungen // VGB Kraftwerkstech. – 1978. – 58. – P. 506–511.
43. Stumm W. Die Anpassung der Wirbelstrom-Verfahren an die Vielfältigen Probleme im Reaktor // Materialprüfung. – 1976. – 18, № 4. – S. 109–114.
44. Титов С. С помощью неразрушающего контроля // Росэнергоатом. – 2011. – № 8. – С. 20–23.
45. 9th International Conference on NDE in relation to structural integrity for nuclear and pressurized components; May 22–24, 2012, Seattle [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.9thnde.com>.
46. The 10th European Conference on Nondestructive testing and technical diagnostics // Russ. J. Nondestructive Testing. – 2008. – 44. – P. 727–731.
47. 18th World Conference on Non destructive testing – WCNDT; Durban, South Africa, 16–20 April, 2012 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.wcndt2012.org.za>.
48. 13th International Conference on Pressure vessel technology; 20–23 May, 2012; Programme. – London: Institution of Mechanical Engineers. – 2012. – 8 p.
49. Weeks J. R. Radiation embrittlement and annealing of VVER pressure vessels // Proceedings of the 4th international symposium «Environmental degradation of materials in nuclear power systems – water reactors» / Ed. by D. Cubicciotti. – Houston: NACE, 1990. – P. 2–64 – 2–75.
50. ENIQ Recommended Practice 10: Personnel Qualification / ENIQ report № 38, European Commission, Joint Research Centre, Institute for Energy, Petten, The Netherlands. EUR 24112 EN. – Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2010. – 26 p.
51. Flaw evaluation procedure and acceptance criteria for nuclear components in ASME Code Section XI / R. C. Cipolla, G. H. DeBoo, W. H. Bamford et al. // Flaw evaluation, service experience, and reliability: Proc. 2003 ASME pressure vessels and piping conf.; Cleveland, July 20–24, 2003 / Ed. by P.-S. Lam. – PVP Series Vol. 463. – New York: ASME Press, 2003. – P. 3–18.
52. Kerntechnischer Ausschuss. Komponenten der Primärkreises von Leichtwasserreaktoren. Teil 4: Wiederkehrende Prüfungen und Betriebsüberwachung, KTA 3201.4, Fassung 2010–2011. – Cologne: KTA, 2011. – 38 S.
53. Kerntechnischer Ausschuss. Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren. Teil 1: Werkstoffe und Erzeugnisformen, KTA 3201.1, Fassung 2010–2011. – Cologne: KTA, 2011. – 160 S.
54. Kerntechnischer Ausschuss. Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren. Teil 2: Auslegung, Konstruktion und Berechnung, KTA 3201.2, Fassung 2010–2011. – Cologne: KTA, 2011. – 157 S.
55. Kerntechnischer Ausschuss. Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren. Teil 3: Herstellung, KTA 3201.3, Fassung 2010–2011. – Cologne: KTA, 2011. – 164 S.
56. Kerntechnischer Ausschuss. Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren. Teil 1: Werkstoffe und Erzeugnisformen, KTA 3201.1, Fassung 2010–2011. – Cologne: KTA, 2011. – 160 S.
57. Kerntechnischer Ausschuss. Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren. Teil 2: Auslegung, Konstruktion und Berechnung, KTA 3201.2, Fassung 2010–2011. – Cologne: KTA, 2011. – 157 S.
58. Kerntechnischer Ausschuss. Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren. Teil 3: Herstellung, KTA 3201.3, Fassung 2010–2011. – Cologne: KTA, 2011. – 164 S.
59. Baylac G., Grandemange J. M. The French code RCC-M: Design and construction rules for the mechanical components of PWR nuclear islands // Nuclear Engineering and Design. – 1991. – 129. – P. 239–254.
60. Heng C., Grandemange J. M., Morel A. RCC-M (Rules for design and construction of nuclear components) // Nuclear Engineering and Design. – 1987. – 98. – P. 265–277.
61. Grandemange J. M. Adaptation of RCC-M design and construction rules to the evolution of projects needs, regulatory evolutions and international exchanges // Proceedings of the ASME 2009 Pressure vessel and piping division conference (PVP2009, July 26–30, 2009; Prague). – Report PVP2009–78046. – ASME. – 2009. – 6 p.
62. Nondestructive examination. Chapter 7 / 0071456368 Pressure Vessels. – McGraw–Hill, 2004. – P. 199–209.
63. Rich S. H., Venkatasubramanian V. Model-based reasoning in diagnostic expert systems for chemical process plants // Computers & Chemical Engineering. – 1987. – 11. – P. 111–122.
64. Milne R. Strategies for diagnosis // IEEE Transactions: Systems, Man and Cybernetics. – 1987. – 17. – P. 333–339.
65. A review of process fault detection and diagnosis. Pt I: Quantitative Model-Based Methods / V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, K. Yin, S. N. Kavuri // Computers & Chemical Engineering. – 2003. – 27. – P. 293–311.
66. Venkatasubramanian V., Rengaswamy R., Kavuri S. N. A review of process fault detection and diagnosis. Pt II: Qualitative models and search strategies // Ibid. – 2003. – 27. – P. 313–326.
67. A review of process fault detection and diagnosis: Part III: Process history based methods / V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, S. N. Kavuri, K. Yin // Ibid. – 2003. – 27. – P. 327–346.
68. Prognostics and health management in nuclear power plants: a review of technologies and applications / J. B. Coble, P. Ramuhalli, L. J. Bond et al. / Report PNNL–21515. – Richland: Pacific Northwest National Laboratory, July 2012. – 124 p.
69. Ayaz E. Component-wide and plant-wide monitoring by neural networks for Borssele Nuclear Power Plant // Energy Conversion and Management. – 2008. – 49. – P. 3721–3728.
70. Real time reactor noise diagnostics for the Borssele (PWR) Nuclear Power Plant / B. Barutcu, S. Seker, E. Ayaz, T. Turkcan // Progress in Nuclear Energy. – 2003. – 43. – P. 137–143.
71. Comparisons between the various types of neural networks with the data of wide range operational conditions of the Borssele NPP / E. Ayaz, S. Seker, B. Barutcu, T. Turkcan // Ibid. – 2003. – 43. – P. 381–387.
72. Overview of the nuclear power plant structural integrity research in Finland / K. Toeroenen, A. Aaltonen, H. Haenninen et al. // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 1993. – 55. – P. 3–59.
73. Advanced instrumentation, information, and control system technologies: nondestructive examination technologies – FY11 report / R. M. Meyer, J. B. Coble, P. Ramuhalli, L. J. Bond / Report PNNL–20671. – Richland: Pacific Northwest National Laboratory, 2011. – 86 p.



74. *Technology readiness level* / Wikipedia. The Free Encyclopedia: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://en.wikipedia.org/wiki/Technology_readiness_level.
75. *Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок*: ПНАЭ Г-7-002–86. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.
76. *Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок сварные соединения и наплавки правила контроля*, ПН АЭ Г-7-010–89. – М.: Энергоатомиздат. – 1989. – 73 с.
77. *Унифицированный ядерный реактор ВВЭР-1000 (В-320)* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://sites.google.com/site/alexianon/chtivo/nuclear/unificirovannyj-adernyj-reaktor-vver-1000-v-320>.
78. *Анализ испытаний материалов корпусов ВВЭР-1000 на ударную вязкость по стандартной программе образцов-свидетелей* / В. Н. Васильченко, В. Г. Ковыршин, Э. У. Гриник, В. Н. Ревка // *Атомная энергия*. – 2008. – **105**, В. 6. – С. 325–329.
79. *Review and comparison of WWER and LWR codes and standards* / Buckthorpe D., Tashkinov A., Brynda J. et al. // *Trans. 17th Internat. Conf. Structural mech. in reactor technology (SMiRT 17) Prague, Czech Republic, August 17–22, 2003. Paper № F01–2*. – 2003. – 8 p.
80. *Brumovsky M. VERLIFE: Unified procedure for lifetime assessment of components and piping in WWER NPPs during operation—updating and further development* / M. Brumovsky // *Proc. ASME 2009 pressure vessels and piping conf. (PVP2009)*. – Vol. 1, Codes and Standards. – Paper No PVP2009–77392. – 2009. – P. 745–750.
81. *Опыт проведения магнито-твердомерического контроля металла корпуса и шахты реактора первого энергоблока Волгодонской АЭС на базе безобразцовой технологии* / М. Б. Бакиров, В. В. Потапов, Б. И. Грибов и др. // *Сб. докладов на VII рос. конф. по реакторному материаловедению*; Димитровград, 8–12 сент. 2003 г. – Доклад № 37. – 19 с.
82. *Loviisa Nuclear Power Plant* / Wikipedia. The Free Encyclopedia: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://en.wikipedia.org/wiki/Loviisa_Nuclear_Power_Plant.
83. *LYRA and other projects on RPV steel embrittlement: Study and mitigation of the AMES Network* / Debarberis L., von Estorff U., Crutzen S. et al. // *Nucl. Eng. Des.* – 2000. – 195. – P. 217–226.
84. *The role of the Joint Research Centre from the European Commission in the European Structural Integrity Networks AMES, ENIQ and NESC* / von Estorff U., Crutzen S., Frigola P. et al. // *Nucl. Eng. Des.* – 1999. – **190**. – P. 347–352.
85. *Horacek L. NDT Qualification achievements for WWER type RPV and piping systems* / L. Horacek // *Proc. ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Conference (PVP2009) July 26–30, 2009, Prague, Czech Republic*. – ASME. – 5. – P. 151–157.
86. *Система ТВ измерительного контроля корпуса реактора СТС-К-78П* / Диаконт: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.diakont.ru/ru/products/katalog/one/catalog_sect=702_id=49.html.
87. *Система контроля СК27* / НИКИТМ «ЭКС-ПЕРТ-ЦЕНТР». 2012 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.ndtexpert.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=14&Itemid=28.
88. *Advanced approach of reactor pressure vessel in-service inspection* / Pajnic M., Markulin K., Matokovic A., Franjic H. // *Proc. 10th European conf. on Non-destr. Testing 10–ECNDT, June 7–11, 2010, Moscow*. – Paper 1-12-16. – М.: RSNTTD. – 2010. – 15 p.
89. *Система контроля СК187* / НИКИТМ «ЭКС-ПЕРТ-ЦЕНТР» 2012 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.ndtexpert.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=13s13&catid=4:k4&Itemid=27.
90. *Реакторы под усиленным контролем* / ENERGOATOM [Опубл. 08.08.2006] [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.energoatom.kiev.ua/ua/news/nngc?_m=pubs&_t=rec&id=14418.
91. *Recent development for inservice inspection of reactor pressure vessels* / K. Fischer, G. Engl, W. Rathgeb, R. Heilmüller // *Nuclear Engineering and Design*. – 1991. – **128**. – P. 51–65.
92. *Heumüller R., Guse G., Rückelt B. Qualification and validation of new SAPHIR – UT–technology* // *The e-Journal of Nondestructive Testing & Ultrasonics*; ISSN: 1435-4934. – 1998. – **3**, № 11. – Paper 317 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ndt.net/article/ecndt98/reliabil/317/317.htm>.
93. *Dirauf F., Gohlke B., Fischer E. Innovative robotics and ultrasonic technology at the examination of reactor pressure vessels in BWR and PWR nuclear power stations* // *The e-Journal of Nondestructive Testing & Ultrasonics*; ISSN: 1435-4934. – 1998. – **3**, № 10. – Paper 222: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ndt.net/article/ecndt98/nuclear/222/222.htm>.
94. *Неразрушающие методы диагностики и контроля металла* / Нац. научный центр «Харьковский физико-технический институт» [Опубл. 14.12.2009] [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.atomic-energy.ru/technology/7406>.
95. *Влащенко А. На Южно-Украинской АЭС начато обследование корпуса реактора энергоблока № 2 изнутри* / *Novosti-N.mk.ua* [14.07.2011] [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://novostin.mk.ua/news/read/?id=32092>.
96. *Реакторная сталь. Условия работы конструкционных материалов и требования к ним* [Электронный ресурс] // *STEELCAST.RU*. – Режим доступа: http://steelcast.ru/reactor_steel00 (15.09.2013).

Stages of development of acoustic emission method for diagnostics of the state of nuclear engineering facilities have been analyzed. It is shown that NDT methods play an extremely important role in ensuring safe operation of NPP reactor cases. Their introduction at the stage of nuclear reactor manufacturing and operation has made significant progress during several decades. The first mention of it dates back to 1958, when a symposium was held on application of NDT methods in nuclear engineering. In its application of radiographic method was noted and the need to apply other NDT methods for complete check of nuclear reactor bodies was emphasized. Later on the Boiler and Pressure Vessel Code developed by American Society for Mechanical Engineering appeared, one of the sections of which is devoted to defining the minimum requirements to vessel manufacture and covers visual examination and diagnostics of the integrity of the body with application of standardized NDT methods, such as magnetic powder, penetrant, radiographic, ultrasonic and eddy current testing. Special attention at the stage of reactor body manufacture was given to welded joints. As shown in the review based on analysis of published sources, nuclear engineering was developing in all the leading countries of the world, and together with it, also application of NDT methods, including acoustic emission. Appropriate normative base was created for it that allows taking NDT to industrial level, and avoiding contradictions in interpretation of diagnostic results. Importance of the work conducted by local and foreign specialists as regards assessment of the condition of WWER reactor bodies is high-lighted, and respective means are described that are used for this purpose. 96 References.

Keywords: acoustic emission, nuclear reactors, diagnostics, world nuclear engineering

Надійшла до редакції
09.06.2014



МЕТОД МНОГОПАРАМЕТРОВЫХ ВИХРЕТОКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ТОЛЩИНЫ, ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ МАТЕРИАЛА И ТОЛЩИНЫ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

А. Я. ТЕТЕРКО¹, В. И. ГУТНИК¹, Г. Г. ЛУЦЕНКО², А. А. ТЕТЕРКО¹

¹Физ.-мех. ин-т им. Г. В. Карпенко НАН Украины. 79060, г. Львов, ул. Научная, 5. E-mail: skal@imp.lviv.ua

²УкрНИИ НК. 04071, г. Киев, ул. Набережно-Луговая, 8. E-mail: pev@ndt.com.ua

На основе концепции построения нелинейной обратной функции преобразования системы вихретоковый преобразователь–модуль обработки сигналов представлен метод многопараметрового контроля толщины, электропроводности материала и толщины защитного диэлектрического покрытия стенок и оболочек изделий из неферромагнитных материалов. Метод обеспечивает уменьшение до десятых долей процента оценку погрешностей контроля указанных параметров и соответственно повышение достоверности результатов диагностики состояния контролируемых объектов, а также характеризуется простотой его программной реализации в аппаратуре. Библиогр. 15, рис. 1.

Ключевые слова: нелинейная функция преобразования, модуль обработки сигналов, электропроводность материалов, оценка погрешности

В современной аппаратуре вихретокового (ВТ) контроля в задачах измерения толщины стенок и оболочек изделий и элементов конструкций, удельной электрической проводимости (УЭП) материала, а также толщины разного вида защитных покрытий реализуют так называемый метод измерения фазы информационного сигнала [1]. При этом информационный сигнал формируют с помощью векторного суммирования сигнала на выходе вихретокового преобразователя (ВТП) со вспомогательным сигналом компенсации таким образом, чтобы фаза информационного сигнала мало зависела от изменений зазора между ВТП и объектом контроля (ОК). Так как влияние зазора на сигнал ВТП является самым значительным мешающим фактором, то степень подавления его в информационном сигнале определяет основную составляющую методической погрешности ВТ измерений фазовым методом [1, 2]. Существует много способов такого формирования информационного сигнала, в частности, описанные в работах [3–5]. Однако нелинейный характер изменения сигнала ВТП при изменении зазора и других параметров в процессе контроля не позволяет в соответствии с указанным подходом, представляющим собой линейное преобразование сигнала ВТП, устранить указанную погрешность. Если на формирование сигнала ВТП в процессе контроля, например, толщины оболочки одновременно влияет три параметра, а именно: толщина, УЭП материала ОК и зазор или толщина диэлектрического покрытия, то методическая погрешность измерения толщины ОК еще возрастает. Поскольку обычно имеет ме-

сто естественное изменение УЭП материала ОК в пределах до 5...7 %, то практически настолько же увеличивается погрешность измерений.

Задачи мониторинга состояния стенок и оболочек ОК в процессе эксплуатации с целью прогнозирования скорости их коррозионного износа, степени деградации материала и других структурных повреждений материала элементов конструкций в авиации, энергетике и других областях, требуют существенного, до десятых долей процента, уменьшения погрешностей оценки измерения таких трех параметров, как толщина, УЭП материала и толщина диэлектрического покрытия. Так как влияние параметров системы «вихретоковый преобразователь–модуль обработки сигналов ВТП» (ВТП–МОС) имеет нелинейный и взаимозависимый характер [1], то решение задачи повышения точности многопараметрового контроля стенок и оболочек изделий современной техники и оборудования методами линейных преобразований сигнала ВТП оказывается невозможным. Решение указанной задачи многопараметрового ВТ контроля возможно на основе разработки нелинейных методов обработки сигнала вихретокового преобразователя [6–8].

В данной работе на основе развития концепции построения нелинейной модели обратной функции преобразования (ОФП) системы ВТП–МОС представлен метод решения задачи повышения точности ВТ измерений толщины, УЭП материала ОК и толщины его диэлектрического покрытия [8, 9]. Отметим, что ОФП по каждому из контролируемых параметров есть функцией измеряемых



значений многомерного вектора информационных параметров системы ВТП–МОС и соответственно не требует решения системы нелинейных уравнений для определения параметров ОК как это осуществляется в работах [6, 7], что обеспечивает эффективную аппаратную реализацию метода.

Основные положения метода. Разработанная в ФМИ им. Г. В. Карпенко НАН Украины концепция решения задач повышения точности ВТ контроля базируется на построении модели прямой и/или обратной нелинейной функции преобразования системы ВТП–МОС [8]. Модель как прямой, так и обратной функции преобразования системы строят на основе единого подхода методами приближения функций многих переменных, которые представляют таблицей значений вектора параметров ОК $x_k = (x_{1k}, \dots, x_{nk})^T$, заданных в $k = 1, \dots, M$ точках области изменений параметров ОК, и соответствующих им измеренных значений вектора информационных параметров $y_k = (y_{1k}, \dots, y_{nk})^T$. При этом ОФП непосредственно ставит в соответствие заданному параметру ОК x_i , $i = 1, \dots, n$ некоторую нелинейную зависимость от составляющих вектора информационных параметров.

Для i -й составляющей вектора параметров ОК модель обратной функции преобразования представлена здесь в следующем виде:

$$x_{iN} = q_i^T g(y), \quad i = 1, \dots, n, \quad (1)$$

где N – размерность модели; $q_i^T = (q_{0i}, q_{1i}, \dots, q_{Ni})$ – вектор $(N+1)$ коэффициентов модели; $g(y) = (1, g_1(y), \dots, g_N(y))^T$ – вектор ортогональных функций.

Модель ОФП (1) линейна относительно вектора неизвестных коэффициентов. Для их определения строят массив входных данных $\{x_k, y_k\}$, $k = 1, \dots, M$, значений вектора параметров ОК и соответствующих им значений вектора информационных параметров в заданной области изменений параметров ОК. Предварительно модель ОФП, с целью оптимизации условий контроля, может быть построена и проанализирована на основании данных вычислений прямой задачи, соответствующей заданной задаче измерения параметров ОК [1]. При этом входные данные могут приниматься как точные или с заданной погрешностью. Номинальную ОФП реальной системы ВТП–МОС строят на основании данных физического эксперимента.

Система уравнений для определения вектора неизвестных коэффициентов модели ОФП методом наименьших квадратов [10] в матричной форме имеет такой вид:

$$x = Yq, \quad x = (x_1, \dots, x_M)^T, \quad (2)$$

где Y – матрица информационных параметров.

Модель ОФП (1) далее представлена нами

многомерным полиномом. Такая модель допускает произвольное разбиение интервалов изменения параметров ОК, что важно на практике при подготовке контрольных образцов, и, кроме того, удобна для аппаратной реализации и анализа. Отметим, что точность ОФП определяется точностью входных данных и точностью определения коэффициентов модели. В свою очередь точность определения коэффициентов зависит от размерности N модели ОФП и количества точек аппроксимации M в заданной области изменения параметров ОК. Если количество точек аппроксимации по каждому из указанных выше трех параметров возрастает до 11, то система (2) содержит достаточно большое число уравнений ($M = 11^3$), что ведет к снижению точности определения вектора коэффициентов модели ОФП [11, 12]. Однако возможны варианты построения моделей ОФП, которые приводят к уменьшению ее размерности. В данной работе снижение размерности ОФП трехпараметровой задачи ВТ контроля сводится к построению модели ОФП системы ВТП–МОС с переменными коэффициентами.

Модель ОФП с переменными коэффициентами. Для трехпараметровой задачи ОФП системы ВТП–МОС, представленная многомерным полиномом (1), например, в виде полного куба, содержит $N = 20$ членов. Коэффициенты такой модели характеризуют чувствительность и ее изменение в заданной области измерения параметров ОК. Для уменьшения размерности модели ОФП нами предложена декомпозиция задачи построения ОФП путем сведения ее к двухпараметровым задачам, а именно: задачи построения частных ОФП для толщины оболочки и УЭП материала при заданных значениях зазора и задачи построения ОФП-2 для толщины диэлектрического покрытия (зазора) и УЭП материала, и далее на этой основе построение в целом двухпараметровой модели ОФП-1 системы с коэффициентами, зависящими от зазора [9].

Обозначим вектор параметров ОК рассматриваемой задачи, как это принято в ВТ контроле [1, 8], в безразмерных величинах:

$$x = (x_1, x_2, x_3)^T = (T, \beta, \alpha)^T, \quad (3)$$

где $\beta = R\sqrt{\omega\sigma\mu_0}$ – обобщенный параметр; σ – УЭП материала; $\omega = 2\pi f$ – частота тока возбуждения ВТП; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; R – эквивалентный радиус ВТП; $T = d/R$, d – толщина оболочки; $\alpha = h/R$, h – толщина диэлектрического покрытия или зазор между ВТП и поверхностью ОК.

Тогда модель ОФП-1 системы ВТП–МОС, представленная полным кубом с коэффициентами, зависящими от зазора, содержит вдвое мень-



ше членов. Для определения толщины оболочки ОФП-1 система будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} T(\text{Re}, \text{Im}) = & a_0 + a_1(\alpha) \text{Re} + a_2(\alpha) \text{Im} + \\ & + a_3(\alpha) \text{Re Im} + a_4(\alpha) \text{Re}^2 + \\ & + a_5(\alpha) \text{Im}^2 + a_6(\alpha) \text{Re}^2 \text{Im} + a_7(\alpha) \text{Re Im}^2 + \\ & + a_8(\alpha) \text{Re}^3 + a_9(\alpha) \text{Im}^3, \end{aligned} \quad (4)$$

где Re , Im – ортогональные компоненты информационного сигнала.

Модель ОФП-1 для определения УЭП материала оболочки будет отличаться коэффициентами, зависящими от зазора, а модели ОФП-2 представляют с постоянными коэффициентами в виде, аналогичном (4).

В соответствии с предлагаемым методом ВТП возбуждают одновременно токами двух частот. Первую из частот ω_1 выбирают из условия оптимальной чувствительности к толщине оболочки, вторую ω_2 – из условия оптимальной чувствительности к удельной электропроводности материала ОК и нечувствительности к изменению толщины оболочки. Условия оптимального выбора частот контроля согласно с общими положениями вихревого метода одновременно связаны с выбором эквивалентного радиуса R обмоток ВТП.

С целью формирования информационных сигналов u_1 и u_2 на каждой из частот, сигналы на выходе ВТП $u_{\text{ВТП1}}$ и $u_{\text{ВТП2}}$ компенсируют до нуля при установке его на контрольном образце с номинальными значениями толщины d_n , УЭП материала σ_n и зазора h_n . Тогда при установке ВТП на контролируемом объекте получают двухчастотный информационный сигнал, который представляет собой изменение сигнала ВТП относительно его

значений на контрольном образце:

$$u_1 = u_{\text{ВТП1}} - u_{n1}, u_2 = u_{\text{ВТП2}} - u_{n2}. \quad (5)$$

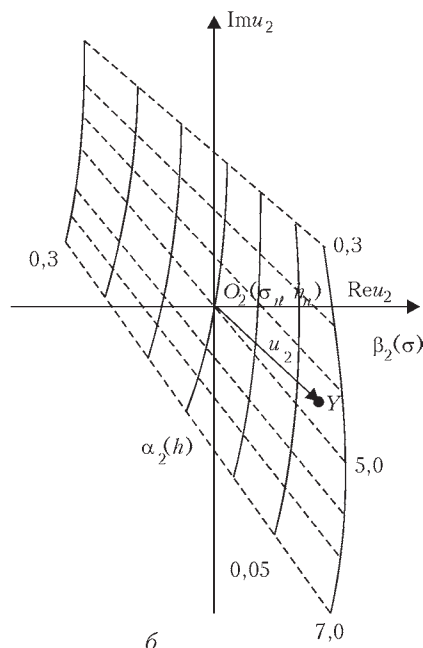
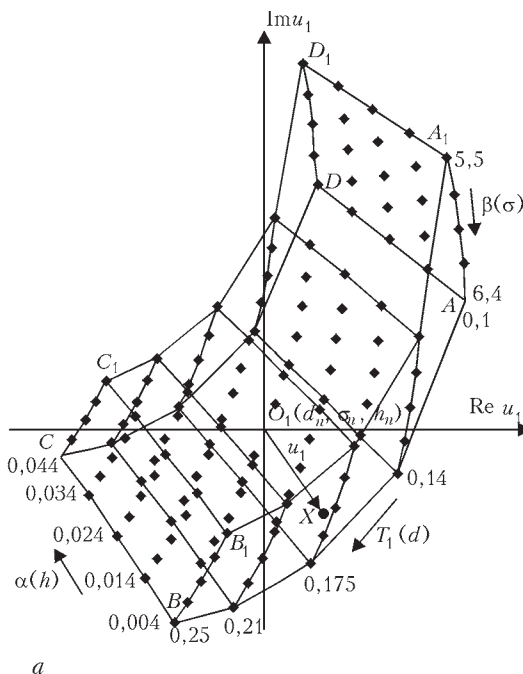
В процессе контроля измеряют ортогональные составляющие информационных сигналов u_1 и u_2 , на основании которых определяют параметры оболочки.

Обратные функции преобразования системы ВТП–МОС строят на основании данных калибровки, используя методы аппроксимации числовых функций. Для калибровки используют комплект контрольных образцов с известными значениями толщины и УЭП материала ОК в заданных диапазонах их изменений, а также комплект образцов зазора из диэлектрического материала в заданном диапазоне изменений толщины покрытия.

Построение ОФП системы с переменными коэффициентами. На рисунке, *а* в комплексной плоскости ($\text{Re}u_1$, $\text{Im}u_1$) представлен фрагмент области изменения информационного сигнала системы ВТП–МОС на частоте ω_1 при изменении относительного значения толщины оболочки $T_1 = d/R$, обобщенного параметра $\beta_1(\sigma)$ (как функции УЭП) и относительного значения зазора $\alpha_1 = h/R_1$ в заданной области изменения параметров ОК: $0,1 \leq T_1 \leq 0,25$; $5,5 \leq \beta_1 \leq 6,4$; $0,004 \leq \alpha_1 \leq 0,044$.

В результате компенсации сигнала ВТП на образце с номинальными значениями параметров ОК точка $O_1(d_n; \sigma_n; h_n)$ является началом координат при измерениях на первой частоте ω_1 ортогональных составляющих вектора информационного сигнала u_1 с концом в точке X области его изменений.

Аналогично вектор информационного сигнала u_2 , сформированный на второй частоте ω_2 , имеет начало в точке $O_2(\sigma_n; h_n)$ (рисунок, *б*) и конец в некоторой точке Y области его изменений. Пара-



Годографы информационных сигналов системы ВТП–МОС при изменении параметров ОК на частоте ω_1 (*а*) и ω_2 (*б*)



метрами, влияющими на формирование вектора информационного сигнала u_2 , являются обобщенный параметр $\beta_2(\sigma)$ и относительное значение зазора $\alpha_2 = h/R_2$. При этом из условия выбора частоты ω_2 изменения толщины ОК на сигнал ВТП не влияет. На частоте ω_2 область изменения параметров ОК выбрана такой: $3,0 \leq \beta_2 \leq 7,0$; $0,05 \leq \alpha_2 \leq 0,3$.

На рисунке, a точками обозначены значения параметров контрольных образцов. Комплект контрольных образцов толщины и УЭП материала ОК имеет P градаций по толщине d и Q градаций по УЭП σ и содержит $P \times Q$ образцов с различной комбинацией толщины и УЭП в заданных интервалах их изменений на ОК. Комплект контрольных образцов диэлектрических прокладок для моделирования толщины диэлектрического покрытия как зазора h имеет R градаций. Калибровку проводят последовательно на частоте ω_1 и ω_2 .

Процедура калибровки на первой частоте ω_1 состоит из R циклов при постоянных значениях зазора в заданном интервале его изменений $\{h_{\min}; h_{\max}\}$ и, таким образом, охватывает область из $M = P \times Q \times R$ точек значений параметров ОК. Рассмотрим один из циклов, например, первый при заданном минимальном значении зазора $h_1 = h_{\min}$ между ВТП и поверхностью контрольных образцов. Калибровка на этом цикле проводится по области $ABBA_1A_1$ (рисунок, a). Программно формируют массив из $P \times Q$ заданных значений параметров контрольных образцов и соответствующих им измеренных значений ортогональных составляющих вектора u_1 информационного сигнала. При этом значения параметров контрольных образцов удобно представлять не в безразмерных величинах, а в реальном масштабе:

$$\langle d_k, \sigma_k; \text{Re}u_{1k}, \text{Im}u_{1k} \rangle, \quad k = 1, \dots, (P \times Q) \text{ при } h_1 = h_{\min}. \quad (6)$$

На последующих циклах изменяют зазор до $h_R = h_{\max}$, при котором проводят калибровку по области DCC_1D_1D (рисунок, a), и формируют множество из R массивов типа массива (6). Для каждого массива из этого множества методом аппроксимации числовых функций строят R частных функциональных зависимостей толщины ОК от измеренных значений составляющих вектора u_1 информационного сигнала типа (4), что представим в таком общем виде:

$$d_i = f_i(\text{Re}u_1, \text{Im}u_1; A_i, h_i) \quad \text{при } h_i = \text{const}, \quad i = 1, \dots, R. \quad (7)$$

В представлении (7) $A_i = (a_{0i}, \dots, a_{Ni})^T$ – вектор коэффициентов, который для каждой частной функции $f_i(*)$ различный в зависимости от зазора h_i . Для каждой из составляющих вектора коэффици-

ентов A_i на основании частных функциональных зависимостей (7) формируют $(N + 1)$ массивов значений составляющих вектора и соответствующих им значений зазора:

$$\langle a_{ki}, h_i \rangle, \quad k = 0, \dots, N, \quad i = 1, \dots, R, \quad (8)$$

и методом аппроксимации функций определяют составляющие вектора коэффициентов $A(h)$ в области $M = P \times Q \times R$ как функций зазора

$$A(h) = (a_0(h), \dots, a_N(h))^T, \quad h_{\min} \leq h \leq h_{\max}. \quad (9)$$

В результате получаем ОФП-1(d) системы для определения толщины оболочки по измеренным значениям вектора информационного сигнала u_1 и зазора:

$$d = f_1(\text{Re}u_1, \text{Im}u_1; A(h)), \quad (10)$$

которая в развернутом виде соответствует функции (4), где составляющие вектора коэффициентов $A(h)$ целесообразно представлять одномерным полиномом.

Аналогично на основании данных, представленных указанным выше множеством из R массивов типа (8), находят коэффициенты ОФП-1(σ) для определения УЭП по измеренным значениям вектора информационного сигнала u_1 и зазора

$$\sigma = f_2(\text{Re}u_1, \text{Im}u_1; C(h)). \quad (11)$$

Значение зазора в свою очередь определяют из ОФП-2(h) системы по результатам измерений составляющих вектора информационного сигнала u_2 .

Процедура калибровки на частоте ω_2 , в результате которой строят ОФП-2 системы, аналогична таковой процедуре на частоте ω_1 . Для калибровки используют Q образцов из комплекта контрольных образцов с различными значениями УЭП материала и R образцов для установки зазора из комплекта диэлектрических прокладок разной толщины. Формируют массив из $Q \times R$ заданных значений параметров контрольных образцов и соответствующих им измеренных значений ортогональных составляющих вектора u_2 информационного сигнала:

$$\langle \sigma_q, h_q; \text{Re}u_{2q}, \text{Im}u_{2q} \rangle, \quad q = 1, \dots, (Q \times R). \quad (12)$$

На основании данных массивов (12) находят векторы коэффициентов $V = (v_0, \dots, v_N)^T$ и $W = (w_0, \dots, w_N)^T$ ОФП-2 системы для определения зазора и УЭП материала по результатам измерений на частоте ω_2 :

$$h = f_3(\text{Re}u_2, \text{Im}u_2; V), \quad (13)$$

$$\sigma = f_4(\text{Re}u_2, \text{Im}u_2; W). \quad (14)$$



Представленная, например, полным кубом двумерная обратная функция преобразования системы для определения зазора ОФП-2(h) имеет вид:

$$\begin{aligned} h(\text{Re}u_2, \text{Im}u_2; V) = & v_0 + v_1 \text{Re}u_2 + v_2 \text{Im}u_2 + \\ & + v_3 \text{Re}u_2 \text{Im}u_2 + v_4 \text{Re}u_2^2 + \\ & + v_5 \text{Im}u_2^2 + v_6 \text{Re}u_2^2 \text{Im}u_2 + v_7 \text{Re}u_2 \text{Im}u_2^2 + \\ & + v_8 \text{Re}u_2^3 + v_9 \text{Im}u_2^3. \end{aligned} \quad (15)$$

Аналогичным образом представляют и ОФП-2(σ) системы для определения УЭП материала ОК. Как отмечалось выше, значения параметров ОК при построении ОФП реальной системы целесообразно вносить в реальном масштабе. Кроме того, ОФП системы в ряде случаев удобно представлять в приращениях (изменениях) параметров ОК относительно их номинальных или других заданных значений [13]:

$$\begin{aligned} \Delta d_i = d_i - d_n, \quad \Delta \sigma_i = \sigma_i - \sigma_n, \quad \Delta h_i = h_i - h_n, \\ i = 1, \dots, M. \end{aligned} \quad (16)$$

Особенности метода. Обратные функции преобразования системы ВТ контроля (10), (11), (13), (14), определяющие вектор параметров контролируемого объекта, ставят в соответствие каждому из параметров ОК функциональную зависимость от измеренных значений составляющих вектора информационного сигнала, представленную в виде аддитивных моделей типа (4) и (15). При этом декомпозиция задачи построения ОФП системы многопараметрового контроля позволяет уменьшить размерность составляющих ее моделей ОФП-1 и ОФП-2 с целью повышения точности их аппроксимации.

Предложенный подход в решении обратной задачи многопараметровых ВТ измерений параметров ОК существенно упрощает реализацию модуля обработки сигналов ВТП, в котором осуществляется формирование информационных сигналов (5), измерение ортогональных компонент этих сигналов и их функциональное преобразование. В отличие от сложностей фазового метода [1–5] процедура формирования информационных сигналов выполняется за один шаг компенсации сигнала ВТП на контрольном образце с номинальными значениями параметров ОК. Для формирования массивов данных (6), (12) в соответствии с процедурой калибровки системы и определения коэффициентов ОФП-1 и ОФП-2 в автономных приборах ВТ контроля следует использовать внешний ПК, что упрощает программную реализацию модуля обработки сигналов ВТП.

Для оценки потенциальной точности определения толщины УЭП материала ОК и толщины его диэлектрического покрытия на основе рассмо-

тренного метода были построены модели ОФП-1 и ОФП-2 системы ВТП – МОС с использованием решения известной прямой задачи о поле кругового витка с переменным током над электропроводящей пластиной [1]. Значения параметров ОК задавали по $M = 11^3$ точкам в области $T = 0,1, \dots, 0,25$; $\beta = 2,0, \dots, 2,2$; $\alpha = 0,004, \dots, 0,044$. При этом приведенная погрешность оценки толщины ОК и зазора не превышала 0,05 %, а обобщенного параметра $\beta - 0,2$ %. Для ОФП-2, построенной по $M = 5 \times 6$ точкам в заданной области изменения параметров ОК, а именно: $\beta = 3, 4, 5, 6, 7$; $\alpha = 0,05; 0,1; 0,015; 0,2; 0,25; 0,3$, приведенные значения погрешностей не превышали 0,6 %. Видно, что с увеличением числа точек аппроксимации точность определения параметров ОК возрастает.

В рамках данного метода возможны варианты, позволяющие существенно уменьшить объем эксперимента при калибровке системы. Так, для определения толщины d (а также УЭП материала) можно ограничиться построением частной функции ОФП-1 (7) при некотором заданном, например, максимальном значении зазора:

$$d_i = f_i^*(\text{Re}u_1, \text{Im}u_1; A(h^*)) \text{ при } h^* = h_i = \text{const}. \quad (17)$$

При этом обычно используют устройство фиксации положения ВТП при достижении им заданного значения зазора, который измеряют, например, с применением емкостного преобразователя [14]. В нашем случае значение зазора определяется ОФП-2(h) (15). Заметим, что применение устройства фиксации положения ВТП значительно усложняет конструкцию датчика. Для устранения этого недостатка можно воспользоваться идеей фиксации значений параметров информационных сигналов u_1 и u_2 в процессе приближения ВТП к поверхности ОК [15] в тот момент времени, когда зазор становится равным заданному значению.

Для обеспечения заданной точности контроля необходимо, чтобы ошибки входных данных при построении ОФП-1 и ОФП-2 были меньшими заданных ошибок определения параметров ОК. При этом изготовление и аттестация контрольных образцов для калибровки по толщине d и зазору h и обеспечение точности измерений информационных параметров не вызывает трудностей. Вместе с тем аттестация образцов с малыми погрешностями по УЭП σ проблематична из-за отсутствия соответствующих средств измерения.

Однако важной особенностью рассмотренного метода является то, что при построении ОФП-1(d) и ОФП-2(h) значение УЭП не вводят. Поэтому погрешность образцов по УЭП не влияет на точность определения толщины ОК d и покрытия (зазора) h . Вместе с тем влияние УЭП в ОФП-1(d) и ОФП-2(h) учитывается в результате того, что указанные функции построены по всем



точкам калибровки системы. Принимая во внимание то, что при диагностике степени деградации материала ОК в процессе эксплуатации интерес представляет изменение УЭП от некоторого первоначального значения, на практике повышение точности контроля изменений УЭП достигают методологическими приемами с использованием реперных зон на конструкции ОК [13] или другими подходами. Отметим также, что измерение УЭП согласно данному методу осуществляется на двух частотах и соответственно характеризуется различной глубиной проникновения вихревых токов. Поскольку структурные изменения материала ОК под действием нагрузок и среды в процессе эксплуатации развиваются с приповерхностного слоя, то измерение УЭП на основании обратных функций преобразования (11) и (14) может быть важной характеристикой при диагностике степени деградации материала ОК.

Выводы

Разработан метод построения модели нелинейной ОФП системы ВТП–МОС для измерения с малыми погрешностями толщины, удельной электропроводности ОК и толщины диэлектрического покрытия в задачах технической диагностики. С целью повышения точности аппроксимации ОФП по данным калибровки системы и соответственно точности вихретокового контроля, предложена декомпозиция задачи построения ОФП путем сведения ее к двухпараметровым задачам и построению моделей ОФП по параметрам ОК меньшей размерности. Оценка точности определения параметров ОК на основании их моделей ОФП, представленных двумерными кубичными полиномами, показала, что погрешности измерения параметров могут не превышать десятых долей процента. При этом использование указанного типа моделей ОФП системы существенно упрощает их аппаратную реализацию.

The concept of plotting the nonlinear inverse function of conversion of «eddy current transducer – signal processing module» system was used as the basis for presentation of the method of multiparametral control of thickness, electric conductivity of material and thickness of protective dielectric coating of the wall and shells of items from non-ferromagnetic materials. Method ensures reduction of evaluation of error in control of the above parameters to tens fractions of a percent and improvement of validity of the results of diagnostics of controlled object state, as is also characterized by simplicity of its program realization in the instrumentation. 15 References, 1 Figure.

Key words: method of multiparametral eddy current changes, control of coating thickness, parameter control error, diagnostics of controlled object state

1. *Неразрушающий контроль*. Справочник в 8-ми т. Т. 2. Вихретоковый контроль, кн. 2 / Под ред. В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2006. – 954 с.
2. Гордиенко В. И., Рыбачук В. Г., Тетерко А. Я. Влияние зазора на точность фазовых измерителей удельной электрической проводимости // *Техн. электродинамика*. – 1988. – № 5. – С. 96–101.
3. А. с. 298880 СССР, МКИ G 01 N 27/04, G 01 r 27/02. Способ контроля удельного сопротивления электропроводных изделий / В. П. Денискин, А. С. Попов, Л. И. Трахтенберг. – № 1359833/18-10; Заявл. 25.08.69; Оpubл. 16.03.71, Бюл. № 11.
4. А. с. 828062 СССР, МКИ G 01 N 27/90. Способ электромагнитного контроля и устройство для его осуществления / А. С. Бакунов, Е. Г. Беликов, Ю. Я. Останин. – № 2784589/25-28; Заявл. 22.06.79; Оpubл. 07.05.81, Бюл. № 17.
5. Пат. UA 98206 C2, МПК G01N 27/90. Спосіб вимірювання електропровідності немагнітних матеріалів / В. М. Учанін. – Заявка № а 2010 10467; Заявл. 30.08.2010; Оpubл. 25.04.2012, Бюл. № 8.
6. Федосенко Ю. К. Основы нелинейной теории многопараметрового вихретокового контроля металлических объектов // *Дефектоскопия*. – 1981. – № 6. – С. 38–45.
7. Федосенко Ю. К. Численный анализ систем уравнений нелинейной теории многопараметрового вихретокового контроля металлических объектов // Там же. – 1981. – № 7. – С. 18–23.
8. Тетерко А. Я., Назарчук З. Т. Селективна вихрострумова дефектоскопія. – Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2004. – 248 с.
9. Пат. UA 102446 C2, МПК G01N 27/90. Спосіб вихрострумових селективних вимірювань параметрів оболонок / А. Я. Тетерко, Г. Г. Луценко, В. І. Гутник. – Заявка № а 201113535; Заявлено 17.11.2011; Оpubл. 10.07.2013. Бюл. № 13.
10. Лоусон Ч., Хенсон Р. Численное решение задач методом наименьших квадратов. – М.: Наука, 1986. – 232 с.
11. Новицкий В. П., Зограф И. А. Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 302 с.
12. Беклемешев Д. В. Дополнительные главы линейной алгебры. – М.: Наука, 1983. – 333 с.
13. *Діагностика технічного стану авіаконструкцій після довготривалої експлуатації* / О. П. Осташ, Д. С. Ківа, В. М. Учанін та ін. // *Техн. діагностика і неразруш. контроль*. – 2013. – № 2. – С. 15–22.
14. US Pat. 6593738, G 01N 27/72, G 01B 007/10, G 01R 033/12. Method and apparatus for measuring thickness of conductive films with use of inductive and capacitive sensors / Kesil B., Margulis D., Gershenson E.(UA). – Publ. 07.05.2003.
15. Пат. UA 103657 C2, МПК G01N 27/90, G01R 33/12. Вихрострумовий спосіб вимірювання питомої електропровідності немагнітних матеріалів / А. Я. Тетерко, В. М. Учанін, В. І. Гутник, О. А. Тетерко. – Заявка №а 2011 10735; Заявл. 06.09.2011; Оpubл. 11.11.2013. Бюл. № 21.

Поступила в редакцию
12.05.2014



А. Я. НЕДОСЕКЕ — 80



20 сентября 2014 г. заведующему отделом технической диагностики сварных конструкций Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, заслуженному деятелю науки и техники Украины, доктору технических наук профессору **Анатолию Яковлевичу Недосеке** исполняется 80 лет.

Анатолий Яковлевич — известный ученый в области обеспечения надежности эксплуатации сварных конструкций, стоящий у истоков создания нового научно-прикладного направления — диагностики сварных конструкций, объектов и сооружений, разработки современных методов оценки несущей способности и прогнозирования остаточного ресурса на основе акустической эмиссии.

В 1953 г. Анатолий Яковлевич окончил Киевский судостроительный техникум, в 1958 г. — Киевский политехнический институт. С тех пор уже более 60 лет его научная и практическая деятельность связана с ИЭС — признанным в мире лидером в области сварки и родственных технологий.

В начале трудового пути Анатолием Яковлевичем были проведены успешные лабораторные и прикладные исследования в области расчета и разработки технологий изготовления уникальных и ответственных сварных конструкций, включая крупные узлы аэрокосмической техники. Были разработаны расчетный метод определения остаточных сварочных напряжений и учета их влияния на несущую способность конструкций при продольном изгибе, эффективные способы снижения остаточных сварочных напряжений, ряд новых методов исследования сварочных деформаций и напряжений. На основе этих разработок созданы и внедрены в промышленность оригинальные устройства, методики и аппаратура.

Дальнейшая работа, связанная с диагностикой сварных конструкций, стала ответом на повышение требований по обеспечению безопасности эксплуатации конструкций, объектов и сооружений, постановку принципиально новых вопросов экологической безопасности, новых подходов к обеспечению качества, надежности и несущей способности сварных конструкций.

По инициативе академика Б.Е. Патона начались работы по обеспечению безопасности эксплуатации конструкций и сооружений. Работы координировались Научным советом по проблеме «Новые процессы сварки и сварные конструкции», организованным Государственным комитетом СССР по науке и технике в 1963 г. при ИЭС. В составе секции «Сварные конструкции» Научного совета начала функционировать рабочая группа «Техническая диагностика и точность сварных конструкций», которую возглавил Анатолий Яковлевич. Ему были поручены организация работ и координация разработок отечественных и зарубежных ученых различных специальностей в решении этой важной задачи.

Так начало развиваться новое научное направление — диагностика технического состояния сварных конструкций в процессе их эксплуатации, оценка их реального остаточного ресурса на основе метода акустической эмиссии. В мировой научной и инженерной практике это направление сейчас признано одним из приоритетных направлений, которое генерирует новые масштабные интеллектуальные технологии.

Для решения поставленных фундаментальных и прикладных задач юбилеем проведены глубокие исследования процессов деформирования и разрушения материалов и сварных соединений в результате быстрых локальных изменений их структуры, зарождения и развития трещин и прочих дефектов, что позволило создать теорию и методы прогнозирования остаточного ресурса и принятия решения о техническом состоянии сварной конструкции.

Визитной карточкой возглавляемого А.Я. Недосекой отдела стали разработки в области акустико-эмиссионной диагностики материалов и конструкций. За многие годы были созданы надежные методы такой диагностики, разработаны датчики, многоканальное измерительное высокочувствительное оборудование и программные средства, обеспечивающие анализ состояния диагностируемых объектов и его прогноз в реальном времени. Диагностическое оборудование стало также эффективным инструментом исследований, позволившим получать, теоретически обосновывать и экспериментально подтверждать данные о механизмах накопления повреждений и развития разрушения в материалах, отрабатывать методы оценки состояния и прогнозирования ресурса.

Результаты выполненных юбилеем исследований обобщены в научном пособии «Основы



расчета и диагностики сварных конструкций». Практическим приложением результатов проведенных работ стали разработка и широкомасштабное промышленное внедрение диагностических мониторинговых и экспертных систем, оборудования, создание и внедрение технологий их применения на производстве, включая инструктивные материалы и государственные стандарты. Среди предприятий, на которых выполнено внедрение, Одесский припортовый завод, Укрхимтрансаммиак, киевские ТЭЦ-5 и ТЭЦ-6.

А.Я. Недосекой представлена концепция перехода от мониторинга состояния конструкций к управлению безопасностью их эксплуатации, начата разработка необходимых для этого научных и технических средств.

На протяжении многих лет Анатолий Яковлевич принимает активное участие в подготовке экспертов, специалистов, инженерных и научных

кадров, под его руководством подготовлены и защищены шесть кандидатских диссертаций. Он является автором более 200 научных работ в области технологии производства, прочности и обеспечения безопасности эксплуатации конструкций и сооружений.

А. Я. Недосека является заместителем Председателя Технического комитета Украины по стандартизации № 78 «Техническая диагностика и неразрушающий контроль», созданного в 1993 г., заместителем главного редактора журнала «Техническая диагностика и неразрушающий контроль».

Успехи в научной и практической работе А.Я. Недосеки отмечены орденом «Дружбы народов», Государственной премией Украины, премией им. Академика Е.О. Патона, грамотой Верховной Рады Украины за выдающиеся заслуги перед украинским народом.



В. Р. СКАЛЬСЬКОМУ — 60



25 червня виповнилось 60 років відомому українському вченому в галузі технічного діагностування та неруйнівного контролю елементів конструкцій, доктору технічних наук, професору **Скальському Валентину Романовичу**.

У 1978 р. Скальський В. Р. закінчив радіотехнічний факультет Львівського політехнічного інституту (тепер Національний університет «Львівська політехніка»). З 1980 р. працює у Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка НАНУ. Пройшов шлях від інженера до завідувача відділу. Сфера його наукових інтересів охоплює механіку руйнування, матеріалознавство, фізику твердого тіла у поєднанні зі створенням методик та засобів діагностування матеріалів і елементів конструкцій методами магнітопружної та акустичної емісії.

За результатами наукових досліджень опублікував понад 400 праць, серед яких 4 довідникові посібники, 9 монографій, навчальний посібник з грифом Міністерства освіти і науки, понад 30 патентів України на винаходи. Його праці опубліковані у таких фахових виданнях як «Engineering Fracture Mechanics», «Materialwissenschaft und Werkstofftechnik», «Wave Motion», «Acta Mechanica et Automatica»? «Фізи-

ко-хімічна механіка матеріалів», «Техническая диагностика и неразрушающий контроль», «Відбір та обробка інформації», «Вісник двигунобудування», «Дефектоскопия» тощо.

За безпосереднього керівництва Вячеслава Романовича виконано низку наукових міжнародних грантів і проектів. Важливим його доробком є участь у розробці та запровадженні у дію Держстандартом України «Рекомендацій щодо акустико-емісійного контролю об'єктів підвищеної небезпеки. Р 50.01.-01», Національного стандарту ДСТУ 4227–2003. «Настанови щодо проведення акустико-емісійного діагностування об'єктів підвищеної небезпеки», який чинний від 01.12. 2003 р.

Суттєвих успіхів Скальський В.Р. досягнув у розробленні теоретичних основ методології кількісного визначення об'ємної пошкодженості кристалічних тіл в області пластично деформованого об'єму за параметрами сигналів акустичної емісії (АЕ). Він довів, що різке зростання амплітуд сигналів АЕ на синхронно записаній з діаграмою руйнування акустограмі свідчить про початок росту макротріщини і запропонував критерій кількісної оцінки об'ємної пошкодженості. Ним встановлено, що визначена за цим критерієм величина коефіцієнта інтенсивності напружень для різних матеріалів інваріантна щодо товщини та способу навантаження матеріалів. Отримав кількісні значення критичної величини об'ємної пошкодженості конструкційних матеріалів у зоні їх



пластично деформованого об'єму, за якими настає макроруйнування.

Значну увагу Скальський В.Р. приділив розробленню методу акустико-емісійного діагностування типів руйнування конструкційних матеріалів за кількісними значеннями параметрів пружних хвиль, що супроводжують руйнування твердих тіл під впливом квазістатичного та циклічного навантаження. В основу цього класифікування покладено критерій, який ураховує найстійкіші характеристики сигналів АЕ, а також параметри вимірювального тракту АЕ систем і первинного перетворювача сигналів та їх вейвлет-перетворення.

За результатами експериментальних досліджень отримано кількісні показники критерію для різних типів конструкційних матеріалів, а також для оцінювання стану водневопошкоджених феромагнетиків. Це дозволило надати відповідні методичні рекомендації щодо АЕ діагностування конструкцій тривалого експлуатування: мостів через ріки Західний Буг, Південний Буг, Прут, Дністер, Дніпро, а також шляхопроводів та транспортних тунелів, нафтотранспортного обладнання нафтопомпувальних станцій, електронно-вакуумних приладів, вінців породоруйнівного інструменту, відшарувань наплавок корпусів реакторів гідрокрекінгу нафти, якості нанесення гальванопокривів на підшипники кочення тощо.

У 2011 р. за цикл наукових праць «Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій» йому присвоєно Премію ім. Є.О. Патона Національної академії наук України, а також визнано винахідником року Національної академії наук України.

Валинтин Романович вніс значний внесок у розвиток введеної Міністерством освіти і науки України спеціальності з технічного діагностування матеріалів і елементів конструкцій, зокрема в

рамках Програми Західного наукового центру зі співробітництва з вищими Західного регіону країни. Підготував цілу низку спеціалістів з даного профілю на кафедрах зварювального виробництва, діагностики і відновлення металоконструкцій Національного університету «Львівська політехніка» та механіки – Львівського національного університету імені Івана Франка, де тривалий час працює професором за сумісництвом. Підготовлені за його участю магістри і спеціалісти є визнаними фахівцями у діагностуванні залишкового ресурсу згаданих об'єктів контролю.

Скальський В. В. створив унікальну лабораторну базу у ФМІ НАН України, де не тільки проводиться підготовка молодих спеціалістів, а й розробляються сучасні методики та засоби технічного діагностування різних промислових об'єктів.

У 2012 р. він отримав Державну премію України в галузі науки і техніки, у 2013 р. йому присвоєно почесне звання Заслужений діяч науки і техніки України та звання Почесного доктора (Doctor Honoris Causa) Луцького національного технічного університету.

Професор Скальський В.Р. є членом Європейського товариства з цілісності конструкцій, членом спеціалізованих вчених рад із захисту докторських та кандидатських дисертацій, членом редколегій фахових наукових журналів, переможцем і лауреатом конкурсів Українського товариства з неруйнівного контролю та технічної діагностики. Підготував двох докторів та 10 кандидатів наук, п'ять його вихованців стали лауреатами премії Президії Національної академії наук України для молодих вчених, два – переможцями Всеукраїнського конкурсу-захисту науково-дослідницьких робіт. Веде активну громадську роботу та керує науковою роботою аспірантів і співшукачів.

*Коллектив Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины
желает юбилярам крепкого здоровья, неиссякаемой энергии, новых научных
достижений в их сложной и многогранной деятельности.*

ОТ ВЫБОРОЧНОГО ПЕРИОДИЧЕСКОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА К МОНИТОРИНГУ УСТАЛОСТИ И НАГРУЖЕННОСТИ, УПРАВЛЕНИЮ РЕСУРСОМ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ И СООРУЖЕНИЙ*

Разработан новый компактный энергонезависимый автономный магнитометрический датчик оценки текущего напряженного и усталостного состояния металла. Это позволило решить задачу непрерывного практического слежения за состоянием любых целостных конструкций и сооружений или их частей посредством набора таких датчиков, объединенных в беспроводную сеть, постоянную или временную. По известному начальному и граничному уровню работоспособности металла и текущим измерениям анализируют ситуативную механическую устойчивость объекта контроля, оценивают скорость деградации, прогнозируют остаточный ресурс, а также упреждают разрушение металла своевременным ремонтом и (или) выбирают, если возможно, более безопасный режим работы объекта контроля.

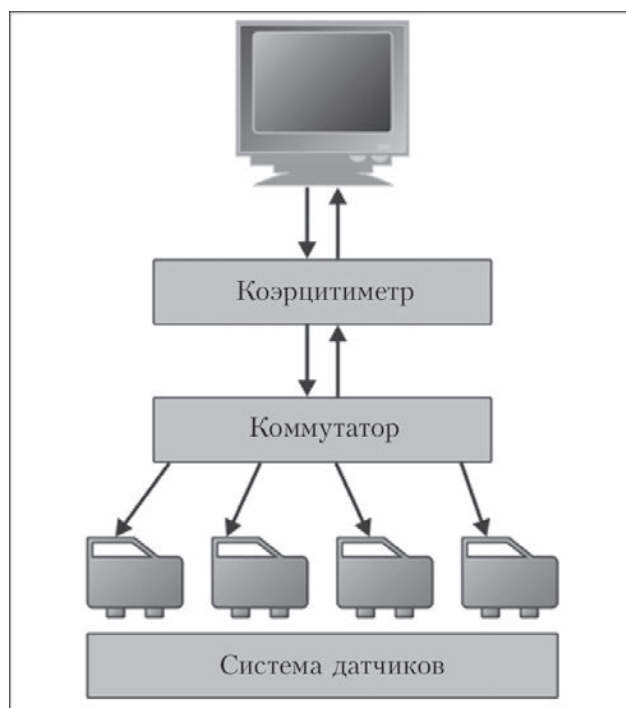
Сегодня практический неразрушающий контроль усталости и нагруженности металла уже реализован как периодический на основе метода коэрцитивной силы в ручном варианте измерений. Реализован также и (непрерывный) мониторинг целостных конструкций с организацией проводной сети контроля простым количественным наращиванием ручного варианта измерений (рисунок).

Здесь в зонах-концентраторах эксплуатационных факторов устанавливают такие же датчики, как и в ручных приборах. Каждый датчик проводами подключен к управляющему специализированному коэрцитиметру, который работает поочередно с каждым удаленным (до сотни метров) датчиком сети как обычный ручной прибор. Без проводной связи в такой системе слежения обойтись невозможно, поскольку работа этого датчика весьма энергозатратна и в беспроводном режиме не может быть реализована в разумно приемлемых габаритах необходимого ему автономного источника питания.

После ручного обследования инструментально это наиболее дешевый вариант слежения, однако проводное электропитание является здесь серьезным ограничительным фактором, из-за которого на многих объектах выполнить такой мониторинг технически невозможно или проблематично.

Для охвата усталостным мониторингом и этих объектов разработан новый датчик, эквивалентный ручному коэрцитиметрическому по информационному потенциалу, но практически не потребляющий электроэнергию. Для связи с ним используют стандартные беспроводные каналы, тип и цена которых определяется конкретной полевой обстановкой на объекте контроля, объемом и скоростью передачи данных.

И в проводном, и в беспроводном мониторинге датчик работает в непрерывном или задаваемом периодическом режиме измерения. Контроль металла можно начинать на любой стадии срока службы. При этом текущий отсчет учитывает уже накопленную ранее деградацию металла по усталостному типу, а также действующие в нем напряжения. В условных единицах измерения состояния металла для каждой марки конструкционного металла определены начальный уровень (нового металла) и конечный, при котором металл начинает разрушаться. Датчик показывает, на сколько металл в контролируемой им зоне-концентраторе близок к недопустимому граничному уровню



* Статья на правах рекламы



усталости и напряжений. Эту информацию с датчиков системы мониторинга (проводной, беспроводной) сравнивают и определяют самое «слабое звено» сооружения. По текущей усталости и времени ее накопления определяют скорость деградации за предыдущий период и прогнозируют время наступления недопустимого состояния. По такой информации, если допустимо варьировать режимы нагружения, управляют ресурсом объекта контроля, избегая концентрации эксплуатационных факторов рассредоточением их во времени и по пространству конструкции, а также предпринимают упреждающий ремонт, усиление или замену металла до его разрушения.

Концептуально это все было давно очевидно, но реализовать усталостный мониторинг до последнего времени было невозможно, так как вообще не было метода практического контроля усталости металла. С утверждением в этом качестве метода коэрцитивной силы в ручном и сетевом проводном вариантах стало ясно, что самую сильную сторону этого метода – непрерывную по времени оценку состояния целостных конструкций и сооружений на массовом практическом уровне и на любом объекте на основе проводной сети возможно практически реализовать только на некоторой части объектов. Большинство остальных объектов могут быть охвачены усталостным мониторингом, реализованным на базе беспроводной сети, основой которой должен быть набор компактных и энергонезависимых экономичных датчиков. Такой датчик удалось разработать на основе главной особенности его работы, состоящей в стационарности его местоположения. В постоянно переставляемом с места на место ручном преобразователе подобная экономичность и малогабаритность недостижимы.

Эти системы мониторинга (проводного-беспроводного) могут быть смонтированы для работы на много лет либо быть ситуативными, размещаемыми на определенное время для уточнения реального, а не кажущегося режима работы контролируемого объекта. Подобные сети могут закладываться еще на стадии проектирования сооружения в рамках стационарных систем автоматического обеспечения его работоспособности

или же встраиваться на любой стадии эксплуатации в уже действующий объект.

Сегодня такая проводная коэрцитиметрическая сеть на корпусе корабля дает возможность следить за сбалансированностью его погрузки–разгрузки, помогает выбрать наилучший курс, при котором не допускается перегрузка конструкций корпуса штормовой погодой. Такая сеть, в частности, помогает управлять режимом работы доменной печи, осознанно минимизируя риски аварий из-за разрушения ее несущих конструкций, отслеживая напряженное состояние кожуха в наиболее опасных местах в зависимости от технологических рабочих параметров. При таком мониторинге слежение за состоянием мостовых переходов, конструкций перекрытий, оползневых и переходных участков магистральных нефте- и газопроводов и т.д. из абстрактно-имитационного или, в лучшем случае, весьма опосредствованного, становится рядовой технологической процедурой эксплуатации объекта, к тому же полностью автоматизированной.

В беспроводном мониторинге удаление от точек контроля до пункта сбора информации при современных сетевых технологиях практически не ограничено и может составлять тысячи километров. При периодическом (ручном) контроле всегда существует угроза пропуска опасного состояния и разрушения металла, если оно созревает в период между предыдущим и последующим обследованиями. Непрерывное во времени слежение на проводной или беспроводной основе позволяет реально перейти к упреждающему способу эксплуатации оборудования и конструкций в части ремонта, усиления или замены по состоянию или управления нагруженностью (при наличии технической возможности). Каждый датчик может быть переведен в режим «спящего слежения», когда он самостоятельно сигнализирует только тогда, когда металл в контролируемой им зоне по напряжению и накопленной усталости превысил заданный порог.

Такой интеллектуальный мониторинг усталости отвечает самым смелым представлениям об эффективной и безопасной эксплуатации конструкций и сооружений.

*Г. Я. Безлюдько, В. А. Захаров, Р. Н. Соломаха,
НПФ «Специальные Научные Разработки»
www.snr-ndt.com*

ПОДПИСКА — 2014

на журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»

Украина		Россия		Страны дальнего зарубежья	
на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
160 грн.	320 грн.	900 руб.	1800 руб.	30 дол. США	60 дол. США

В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.



Подписку на журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» можно оформить непосредственно через редакцию или по каталогам подписных агентств «Пресса», «Идея», «Прессцентр», «Информнаука», «Блицинформ», «Меркурий» (Украина) и «Роспечать», «Пресса России» (Россия).

Подписка на электронную версию журнала
«Техническая диагностика и неразрушающий контроль»
на сайте: www.patonpublishinghouse.com.

Правила для авторов: www.patonpublishinghouse.com/rus/journals/tdnk/rules
Лицензионное соглашение: www.patonpublishinghouse.com/rus/journals/tdnk/license
В 2014 г. в открытом доступе архивы статей журнала за 2003–2012 гг.

РЕКЛАМА в журнале «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»

Реклама публикуется на обложках и внутренних вклейках следующих размеров

- Первая страница обложки (190x190 мм)
- Вторая, третья и четвертая страницы обложки (200x290 мм)
- Первая, вторая, третья, четвертая страницы внутренней обложки (200x290 мм)
- Вклейка А4 (200x290 мм)
- Разворот А3 (400x290 мм)
- 0,5 А4 (185x130 мм)
- 0,25 А4 (90x130 мм)
- Размер журнала после обрезки 200x290 мм

- В рекламных макетах, для текста, логотипов и других элементов необходимо отступать от края модуля на 5 мм с целью избежания потери части информации. Все файлы в формате IBM PC

- Corell Draw, версия до 10.0
- Adobe Photoshop, версия до 7.0
- QuarkXPress, версия до 7.0
- Изображения в формате TIFF, цветовая модель CMYK, разрешение 300 dpi

Стоимость рекламы и оплата

- Цена договорная
- По вопросам стоимости размещения рекламы, свободной площади и сроков публикации просьба обращаться в редакцию

- Оплата в гривнях или рублях РФ по официальному курсу

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

- Для постоянных партнеров предусмотрена система скидок

- Стоимость публикации статьи на правах рекламы составляет половину стоимости рекламной площади

- Публикуется только профильная реклама (техническая диагностика и неразрушающий контроль)

- Ответственность за содержание рекламных материалов несет рекламодатель

Контакты:

Тел./факс: (38044) 205-23-90; 200-54-84
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com

Подписано к печати 29.07.2014. Формат 60×84/8. Офсетная печать.
Усл. печ. л. 9,04. Усл.-отт. 9,89. Уч.-изд. л. 10,24
Печать ООО «Фирма «Эссе».
03142, г. Киев, просп. Акад. Вернадского, 34/1.