

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

Издатель: Международная ассоциация
«Сварка»

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

**Главный редактор
Б. Е. ПАТОН**

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

Адрес редакции

03680, Украина, г. Киев-150,
ул.Боженко, 11
Институт электросварки
им.Е.О.Патона НАН Украины
Тел.: (044) 205-23-90
Факс: (044) 200-54-84, 200-82-77
E-mail: journal@paton.kiev.ua
http://www.nas.gov.ua/pwj
URL: www.rucont.ru

Научные редакторы

Н. Г. Белый, А. А. Грузд

Редактор

Т. В. Юштина

Электронная верстка

Л. Н. Герасименко, Д. И. Середа

Свидетельство
о государственной регистрации
КВ4787 от 09.01.2001

Журнал входит в перечень
утвержденных ВАК Украины
изданий для публикации трудов
соискателей ученых степеней.
При перепечатке материалов
ссылка на журнал обязательна.

СОДЕРЖАНИЕ

50 лет во главе Национальной академии наук Украины..... 3

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

**ПАТОН Б. Е., ЛОБАНОВ Л. М., НЕДОСЕКА А. Я.,
НЕДОСЕКА С. А., ГРУЗД А. А., ЯРЕМЕНКО М. А.,**
Опыт ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины в области
акустико-эмиссионного контроля 7

СУЧКОВ Г. М., ХАЩИНА С. В., ПЕТРИЩЕВ О. Н. Развитие
концепций создания ультразвуковых преобразователей
электромагнитного типа. Режим возбуждения. Часть 1 23

КОРЖИК О. В., НАЙДА С. А., ДЕНИСЕНКО В. І.
Один з методів розв'язання задачі стаціонарної
гідроелектропружності для режиму прийому звукових хвиль
антенними решітками, що утворені системами стержневих
перетворювачів 29

ЄРЕМЕНКО В. С., ПЕРЕЇДЕНКО А. В., МОНЧЕНКО О. В.
Застосування нейромережевих технологій у системах
неруйнівного контролю 35

КАРПАШ М. О. Дослідження взаємозв'язку механічних
характеристик, мікроструктури та інформативних параметрів
неруйнівного контролю 42

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

**ФОМИЧЕВ С. К., ПИРУМОВ А. Е., МИНАКОВ С. Н.,
МИНАКОВ А. С., ДАНИЛЬЧИК А. В., МИХАЛКО С. В.,
ЯРЕМЕНКО М. А.** Сбор, накопление и визуализация данных
мониторинга напряженного состояния магистральных
трубопроводов 49

СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ

**РАДИШ Ю. В., ЦЕЧАЛЬ В. О., КИРЄЄВ А. С., ШЕВЧЕНКО І. Я.,
РАДЬКО В. Г.** До питання гармонізації стандарту
ДСТУ-Н Б А.3.1-15:2010. Настанова з ультразвукового
контролю зварних з'єднань металевих конструкцій. Частина 1 53

ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ

И. К. ПОХОДНЕ — 85..... 59

М. Г. БІЛОМУ— 75 60

Календарь конференций и выставок по НК в 2012 г. 63

ИЗДАНИЕ ЖУРНАЛА ПОДДЕРЖИВАЮТ:

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



Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики

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

Publisher: *International Association «Welding»*

EDITORIAL BOARD

**Editor-in-Chief
B. E. PATON**

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

Address

The E. O. Paton Electric
Welding Institute
of the NAS of Ukraine,
11 Bozhenko str.,
03680, Kyiv, Ukraine
Tel.: (044) 200-23-90,
Fax: (044) 200-54-84, 200-82-77
E-mail: journal@paton.kiev.ua
http://www.nas.gov.ua/pwj
URL: www.rucont.ru

Scientific editors

N. G. Bely, A. A. Gruzd

Editors

T. V. Ushtina

Electron galley

L. N. Gerasimenko, D. I. Sereda

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

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

CONTENT

50 years as the Head of the National Academy
of Sciences of Ukraine 3

SCIENTIFIC-TECHNICAL

Paton B.E., Lobanov L.M., Nedoseka A. Ya., et al. Experience
of the E.O.Paton Institute of the NAS of Ukraine in the field of
acoustic-emission monitoring 7

Suchkov G.M., Khashchina S.V., Petrichev O.N. Development of
concepts of designing ultrasonic transducers of electromagnetic
type. Excitation mode. Part 1..... 23

Korzhih O.V., Naida S.A., Denisenko V.I. One of the methods of
solving the problem of stationary hydroelectroelasticity for the
mode of reception of sound waves by arrays formed by systems
of rod transducers..... 29

Eremenko V.S., Pereedenko A.V., Monchenko O.V. Application of
neural network technologies in NDT systems..... 35

Karpash M.O. Investigation of interrelation of mechanical
characteristics, microstructure and informative parameters of NDT 42

INDUSTRIAL

Fomichev S.K., Pirumov A.E., Minakov S.N., et al. Acquisition,
accumulation and visualization of the data of monitoring the
stressed state in the main pipelines..... 49

STANDARTIZATION AND CERTIFICATION

Radish Yu.V., Tsetchal V.O., Kireev A.S., et al. On harmonizing
DSTU-N B A.3.1-15:2010. Guidelines on ultrasonic testing of
welded joints of metal structures. Part 1 53

NEWS

I.K. Pokhodnya is 85..... 59

M.G. Bely is 75..... 60

Schedule of NDT conferences and exhibitions in 2012 63

JOURNAL PUBLICATION IS SUPPORTED BY:

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



Ukrainian Society for Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics



ОПЫТ ИЭС им. Е. О. ПАТОНА НАН УКРАИНЫ В ОБЛАСТИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ

Академик **Б. Е. ПАТОН**, академик НАН Украины **Л. М. ЛОБАНОВ**, **А. Я НЕДОСЕКА**,
С. А. НЕДОСЕКА, д-ра техн. наук, **А. А. ГРУЗД**, **М. А. ЯРЕМЕНКО**, кандидаты техн. наук
 (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Представлены основные результаты исследований и разработок в области создания технологии контроля на основе акустической эмиссии (АЭ), выполненных в ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины с 1963 г. по настоящее время. Показано применение технологии АЭ контроля в промышленности. Освещены вопросы создания нормативной базы и подготовки специалистов в области АЭ контроля. Рассмотрены перспективы развития данного направления с учетом общемировых тенденций.

The paper presents the main results of research and development in the field creation of inspection technology based on acoustic mission (AE) performed at the E.O.Paton Institute since 1963 up to now. Application of AE inspection technology in industry is shown. Questions of compiling the normative base and training specialists on AE inspection are highlighted. Prospects for development of this field taking into account the global tendencies are considered.

Сегодня метод акустической эмиссии (АЭ) является одним из наиболее эффективных и широко используемых средств диагностики состояния материалов промышленных конструкций. Уникальность метода состоит в том, что, с одной стороны, он не требует внешнего источника возбуждения для получения данных о состоянии материалов, с другой — позволяет получать информацию о дефектах на значительном удалении от них. Развитие дефектов служит источником акустических волн, которые распространяются в материале на значительные расстояния, а их локация несколькими датчиками позволяет определить местонахождение опасного участка.

Анализ параметров зарегистрированных приборами акустических сигналов во многих случаях дает возможность оценить опасность процессов, происходящих в деформируемом материале, и спрогнозировать разрушающую нагрузку и остаточный ресурс конструкции.

Это позволяет превращать конструкции в интеллектуальные устройства, собирающие информацию о своем состоянии и оценивающие его в реальном режиме времени, обеспечивая, таким образом, свою безопасность. Современная компьютерная техника, технологии Интернета, сетевой и беспроводной связи делают реальным дистанционный доступ к диагностической информации, позволяют анализировать и обобщать получаемые данные в рамках сетей промышленных предприятий и целых отраслей.

Технология автоматизированного АЭ контроля, которая актуальна сегодня и имеет серьезные перспективы использования в будущем, внедрена и работает на ряде промышленных предприятий Украины, внося свой вклад в обеспечение надеж-

ной эксплуатации потенциально опасных объектов народного хозяйства. Такой результат был бы невозможен без длительных научных и инженерных разработок, в частности, проводимых и Институтом электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины (ИЭС) уже более 40 лет.

Краткая история. В 1963 г. при ИЭС был создан Научный совет «Новые процессы сварки и сварные конструкции» Государственного комитета СССР по науке и технике, положивший начало работам по созданию теории и методов прогнозирования работоспособности конструкций. При секции Научного совета «Сварные конструкции» была создана рабочая группа № 3 «Техническая диагностика и точность сварных конструкций». Основное внимание рабочей группы было сосредоточено на традиционном вопросе технологии производства сварных конструкций — обеспечении их точности. Изучение механизма явлений, связанных с процессом сварки и приводящим к потере конструкциями несущей способности, позволило получить важные теоретические результаты и основанные на них методы и средства борьбы с короблением сварных конструкций. Вторым, не менее важным, достижением этих исследований стали работы, появившиеся вначале как сопутствующие, а затем выделившиеся в самостоятельное направление, по оценке состояния материала конструкций.

Своевременно сделанный акцент на применении вычислительной техники позволил совершенно по-новому взглянуть на проблему обеспечения безопасной эксплуатации сварных конструкций. Уже в начале 1970-х годов были заложены основы построения информационно-измерительных систем, предназначенных для контроля



и оценки состояния материала, высказаны идеи непрерывного мониторинга конструкций и использования беспроводной связи [1]. Необходимо было создать методику контроля и разработать такую технологию, которая могла бы указывать координаты мест развивающихся дефектов и расшифровывать информацию, несущую сведения о накоплении повреждений и развитии трещин в материале, научить системы контроля прогнозировать разрушение и остаточный ресурс материалов эксплуатирующихся конструкций. Реализация этой задачи произошла намного позже, вместе с появлением технологии контроля, основанной на явлении АЭ материалов, генерируемой ими в процессе разрушения. Задача оказалась достаточно сложной, а информационные технологии и средства коммуникации того времени были не готовы к их решению.

Первые компьютеризированные АЭ системы «Аккорд», «Октава» и ряд других, созданные в ИЭС в этот период, были по меркам сегодняшнего дня громоздкими и отличались невысоким быстродействием, тем не менее, только благодаря цифровой обработке информации стало возможным проведение эффективного анализа получаемых данных, выделение их полезной составляющей из огромного потока АЭ сигналов.

Появление систем АЭ контроля заинтересовало оборонную и космическую отрасли промышленности, в результате чего был проведен ряд АЭ исследований целостности корпусов топливных баков ракет в ГКБ «Южное» им. М. К. Янгеля, показана эффективность метода при поиске несплошностей и нарушений геометрии крупногабаритных изделий. Даже поиск незакрепленных или плохо закрепленных деталей внутри корпусов контролируемых изделий стал значительно проще и быстрее.

В то время, как решение задачи поиска при помощи АЭ мест развития дефектов успешно продвигалось вперед, основная разрабатываемая проблема — оценка состояния материала и определение его ресурса — пока еще находилась на начальном этапе разрешения. Результаты проводимых исследований показали насколько она сложна. В 1978 г. ИЭС принято решение о необходимости более глубокого ее изучения, а в 1979 г. решением Научного совета по проблеме «Новые процессы сварки и сварные конструкции» приступила к работе новая его секция «Диагностика надежности сварных конструкций». Возглавил работу секции академик Б.Е. Патон. В 1983 г. на базе лаборатории по технической диагностике сварных конструкций организован структурный отдел ИЭС этого направления, а спустя некоторое время при Президиуме Академии наук Украины был создан Научный совет по проблеме «Техническая диагностика и неразрушающий контроль», в составе которого начали работать более 20 ин-

ституты и организаций. С этого момента работы в области обеспечения безопасности эксплуатации конструкций стали носить целевой, планируемый характер.

В начале 1982 г. круг специалистов, работающих в области технической диагностики, расширился за счет стран—членов СЭВ. Результатом такого сотрудничества стало создание первого портативного прибора для диагностики материалов на базе метода АЭ, использующего для получения и обработки цифровых данных персональный компьютер. Конструкция прибора была разработана Венгерским институтом ядерных исследований ЦИФИ, а программное обеспечение — ИЭС. Это еще не была в полном смысле диагностическая система, хотя прибор выполнял достаточно много функций, упрощающих анализ получаемых данных и принятие решения о состоянии материала [3]. Прибор, помимо лабораторных исследований, был использован при диагностике промышленных объектов, в частности, трубопроводов в условиях вечной мерзлоты (Тюмень, Уренгой), а также тепловой электростанции в Польше (Жерань). Один прибор был также приобретен Северным машиностроительным предприятием и применен для контроля корпусов подводных лодок.

Очень важным, помимо собственно создания нового высокотехнологичного АЭ устройства, оказался удачно выбранный способ кооперации. Начиная с этого момента, ИЭС больше не занимался непосредственно изготовлением АЭ оборудования, предоставив это специалистам в области электроники, хотя консультативно участвовал в его разработке. Основные же усилия были сосредоточены на создании технологии, средств и программного обеспечения для оценки текущего состояния материалов действующих конструкций, прогнозирования ресурса и продления срока их безопасной эксплуатации.

В начале 1993 г. была разработана новая, более совершенная модель диагностической аппаратуры — системы диагностики семейства ЕМА (Evaluation of Material Ability). Новшеством стало то, что она работала не только с датчиками АЭ, но и с другими типами датчиков, обеспечивая параллельный ввод в компьютер акустических, эксплуатационных и технологических параметров. Аппаратура реализовала введенное по предложению ИЭС новое комплексное понятие в оценке материала при его деформировании — «вектор состояния», представляя к рассмотрению не отдельные измеряемые величины, а их комплекс. Создание таких систем позволило вплотную подойти к решению задач оценки опасности состояния материала, прогнозирования разрушения и определения остаточного ресурса конструкций в процессе эксплуатации.



Опыт использования систем ЕМА-1 и ЕМА-2 показал, что для решения задач оценки и прогнозирования состояния материала, особенно в промышленных условиях, требуется внести ряд кардинальных изменений в конструкцию АЭ аппаратуры, технологию контроля и построение программного обеспечения. Стало очевидным, что требуется использование многоканальных систем с независимой работой отдельных каналов, возможность промышленного исполнения их корпусов с целью установки на производстве и использование многоцелевой, стабильно работающей операционной системы с интегрированными средствами сетевой коммуникации. Параллельно с разработкой нового программного обеспечения, выполняющего прогноз разрушения и предназначенного для работы в компьютерных сетях под управлением Microsoft Windows с ядром NT, с 1997 г. началась разработка современной аппаратуры ЕМА-3 [10]. В 2000 г. был изготовлен и прошел испытания первый лабораторный образец, а начиная с 2001 г. началось внедрение новой системы на Одесском припортовом заводе [8], где в настоящее время эксплуатируется восемь диагностических комплексов, а на конструкциях предприятия установлено более 300 АЭ датчиков. Впоследствии системы ЕМА-3 начали использовать и другие предприятия, в частности, Николаевский глиноземный завод, Укрхимтрансмиак, Техдиагаз, Киевэнерго (рис. 1).

В настоящее время аппаратура и программное обеспечение ЕМА-3 постоянно совершенствуются, а созданные на их основе мобильные и мониторинговые системы работают в различных отраслях украинской промышленности. Главными их особенностями являются возможность автономной работы в течение длительного времени и автоматизированная оценка состояния материала, включающая определение уровня опасности, прогноз разрушающей нагрузки и остаточного ресурса.

Исследования и результаты. Проводимые в ИЭС исследования с самого начала охватывали широкий круг вопросов: разработку конструкции АЭ аппаратуры и датчиков, изучение явления АЭ в разнообразных условиях деформирования материала и влияния окружающей среды, создание и совершенствование методов локализации координат источников АЭ, поиск закономерностей возникновения и изменения сигналов АЭ в процессе накопления повреждений и развития разрушения, создание и проверку критериев оценки состояния материала.

Механические испытания в условиях статического (в том числе на машинах с высокой жесткостью), циклического и ударного нагружения показали, что АЭ позволяет отслеживать процесс развития повреждаемости и разрушения конструкционных материалов фактически на всех стадиях, включая и собственно развитие трещин,

вплоть до разрушения [4]. Использование АЭ аппаратуры в качестве сканирующего средства позволило оценить влияние накопления повреждений на акустические характеристики материалов различных классов [6].

Большое внимание было уделено исследованиям влияния сварки на параметры АЭ в материале [2, 5, 13, 17]. В частности, показано, что при наличии в образце сварного соединения, последнее является основным источником АЭ. Для образцов со сварными соединениями характерно большее разнообразие получаемой картины распределения АЭ, амплитудных и других характеристик, чем для образцов без сварки, а на активность АЭ влияет степень поврежденности материала, внесенного сваркой. Наиболее важным был вывод о том, что наличие сварного соединения повышает информативность метода АЭ.

Промышленное применение метода в химической и энергетической отраслях потребовало проведения специфических исследований влияния зашумленности, наличия изоляции, перехода сред и высоких температур на данные АЭ контроля. В результате разработаны программные методы фильтрации сигналов АЭ в условиях зашумления, показано, что в объектах с изоляцией возможно устанавливать датчики на достаточно больших расстояниях. Показано, что поглощение сигнала на границах сред воздух–металл–вода более чем в два раза выше по сравнению с границей сред воздух–металл–воздух; на границах сред воздух–металл–вода поглощение сигнала более чем в три раза, на границах сред вода–металл–вода — более чем в четыре раза. Важно, что при угасании сигнала в три раза процедура АЭ контроля при определенных условиях также возможна.

Показано, что состояние объектов, работающих при высоких температурах, может быть корректно оценено при помощи метода АЭ [17]. Установлено изменение акустических характеристик исследованных материалов при повышении нагрева рабочей части образца свыше 350 °С. Материал без дефектов или с небольшим их количеством с точки зрения проведения АЭ испытаний менее информативен при высоких температурах, и для определения состояния объектов контроля требуется высокая чувствительность измерительной аппаратуры и специальная методика измерений. Для материала объектов с концентраторами напряжений, сварными соединениями или существенно развитыми дефектами, АЭ испытания могут быть проведены с использованием стандартных методик. При температурах, превышающих 500 °С, актуальной проблемой является обеспечение работы датчиков АЭ, в связи с чем целесообразным представляется использование специальных волноводов, снижающих температуру рабочего участка датчиков. Выполняемый системой



ЕМА-3 прогноз разрушающей нагрузки по данным АЭ зависит от объема получаемой АЭ информации. В тех случаях, когда ее недостаточно для принятия решения о состоянии объекта контроля, следует использовать специальные приемы, позволяющие повысить информативность метода, в частности, переход от локации источников АЭ к зонному контролю.

Полученные результаты позволили продолжить работы по специальной программе с целью набора статистических данных, обработки алгоритмов и программного обеспечения диагностических и мониторинговых АЭ систем, контролируемых объектов, которые работают в условиях высоких температур. Опытный вариант такой системы, контролирующей высокотемпературные объекты цеха производства аммиака, уже используется на Одесском припортовом заводе (рис. 2).

Проведенный анализ состояния материалов разрушившихся изделий, комплексное исследование кинетики накопления повреждений при разрушении образцов из исходного материала и материала, находившегося длительное время в эксплуатации, позволили предложить методику прогнозирования остаточного ресурса на основе оценки постепенного накопления повреждений в процессе работы под нагрузкой.

Параллельно экспериментальным исследованиям развивались теоретические. Получаемые экспериментальные данные имели чрезвычайно сложный, иногда противоречивый характер, не всегда могли быть описаны в рамках известных волновых или статистических закономерностей. Приведем лишь некоторые примеры таких неоднозначностей, которые необходимо научно объяснить:

- при механических испытаниях образцов, вырезанных из прилегающих участков одной и той же конструкции, характер возникновения, распределения и величины параметров АЭ различны;
- число событий АЭ, зарегистрированных в образцах из труб с длительной наработкой, в одних случаях растет, в других уменьшается по отношению к исходному материалу;
- при одинаковом материале и геометрии конструктивных элементов параметры затухания сигналов АЭ отличаются в несколько раз;
- известная гипотеза о микротрещинах как основном источнике АЭ на стадиях деформирования, предшествующих разрушению, не нашла экспериментального подтверждения, поскольку в большей части испытанных образцов, кроме образцов из аварийных участков труб, трещин не наблюдалось вплоть до момента разрушения.

Все имеющиеся результаты исследований необходимо было объяснить в рамках единой, непротиворечивой системы. Для этого потребовались новые подходы к описанию АЭ как следствия процесса накопления повреждений и разрушения ма-

териалов, создание аналитических методов расчета волновых полей, математических моделей, связывающих повреждаемость материала и его акустические свойства, методики прогноза состояния материала по имеющимся на момент контроля результатам АЭ измерений.

Была сформулирована базовая гипотеза о зависимости АЭ преимущественно от сформировавшегося в материале поля повреждений. Изменение плотности поврежденного материала, изменение параметров акустических сигналов в поврежденном материале, рост числа сигналов АЭ при увеличении объема повреждений, внесенных сваркой, позволили рассматривать дискретное возникновение пустот как основной источник АЭ при деформировании на стадиях, предшествующих образованию и росту трещин. Эти данные, подтвержденные также металлографическими исследованиями, могут быть корректно объяснены квантовым подходом к описанию явления АЭ.

Представление процесса разрушения материала в виде отдельных квантов и разработка аналитического аппарата описания процедуры разрушения позволили сформулировать и решить задачу о возникновении и распространении волн АЭ в различных конструктивных элементах, в частности, стержнях и пластинах [11, 13, 16]. Удалось показать, какие виды волн вносят наиболее существенный вклад в регистрируемые параметры АЭ, какие полосы частот являются наиболее приемлемыми для их регистрации и как размеры и характеристики возникающих дефектов связаны с амплитудными характеристиками получаемого АЭ сигнала. Создан универсальный вариант расчета, позволяющий получить решения волновых уравнений с любой комбинацией параметров упругой волны применительно к волновой задаче в пластине с возникшим микродефектом. Интегрирование полученных уравнений перемещений в материале выполнено на компьютере численным методом, а полученные результаты позволили описать распространение волн при разнообразных граничных условиях, а также оценить влияние характеристик датчиков АЭ на спектр и форму распространяющихся в материале волн на различном удалении от источника. Полученные решения позволили создать обучающую программу для коррекции невязок вектора состояния материалов.

Проведенные расчеты позволили на основе развития аналитических методов оценки состояния материала, данных АЭ и использования современной вычислительной техники и методов компьютерного моделирования построить физически обоснованную модель АЭ и перейти на базе созданной модели к прогнозу состояния материала.

Задачу прогноза разрушения начали решать с установления связи между кинетикой повреждаемости материала и возникающей вследствие это-



го АЭ. Импульсы акустической эмиссии являются результатом динамического, дискретного увеличения объема пустот в материале уже на самых ранних стадиях деформирования. Это квантовый процесс, который даже при равномерном нагружении материала происходит дискретно. В процессе деформирования материала происходит возникновение пор, их рост, слияние и, в конечном счете, формирование трещины. Высвобождение энергии при каждом таком событии происходит динамически, порождая АЭ. При этом величина амплитуды возникшей волны, как показали расчеты, зависит от вновь возникшего объема пустоты в материале. На рис. 3 представлены частотные характеристики волн, распространяющихся в тонких пластинах со скоростями, меньшими скорости C_2 — волны Рэлея ($C_2 = 0,31$ см/мкс). Из рис. 3, а видно, что чем толще пластина, тем большая составляющая в ее спектре волны с низкой скоростью. Например, для пластины толщиной 0,4 см появляются волны, распространяющиеся со скоростями $0,1C_2$ (красная кривая). В более толстых пластинах спектр распространяющихся волн сужается и в пластине толщиной 10 см движется практически одна волна со скоростью $0,927C_2$ — близкая к рэлеевской по свойствам. На рис. 3, б, в представлены амплитуды и спектр волн, распространяющихся со скоростями ниже (рис. 3, б) и выше (рис. 3, в) скорости C_2 . Видна зависимость амплитуды волны от толщины пластины и расстояния от места излучения.

Как видно, одинаковый по мощности источник генерирует в тонкой пластине большие амплитуды волн, чем в толстой. Таким образом, становится ясным, что энергия излучения быстрее поглощается в большем объеме металла. На рис. 3, в представлена волна Лэмба, распространяющаяся со скоростью 0,4375 см/мкс с учетом влияния частотных параметров АЭ датчиков. В данном случае датчик настроен на прием АЭ волн в диапазоне волновых чисел $0,6...1,0$ см⁻¹. Усредненная частота 52,2 кГц, длина волны 7,8 см.

Была построена и реализована на компьютере модель, которая дает возможность получать типовые «портреты» АЭ в зависимости от формирования и развития различных полей повреждений. Модель основывается на экспериментальных данных и позволяет задавать различные условия по первоначальной пористости, характеру формирования разрушения, учитывать влияние концентрации напряжений и другие факторы, определяющие характер развития повреждений в материале. Подтверждением ее достоверности послужило решение обратной задачи — было показано, что смоделированные параметры акустических сигналов, проходящих через материал, изменяются таким же образом, как в физическом эксперименте. Был проделан большой объем численных

экспериментов для получения эталонных характеристик АЭ процессов в широком спектре условий накопления повреждений.

Далее перешли к распознаванию — сравнению экспериментальных данных с эталонами — и прогнозу на этой основе разрушающих нагрузок. Распознавание образа выполняется с применением так называемых учителя и самообучения [12, 13]. Данные, полученные в процессе АЭ испытаний, сравнивают с эталоном и определяют прогнозируемую разрушающую нагрузку. В результате обработки более 200 результатов экспериментальных данных (на образцах и натуральных объектах) были получены удовлетворительные результаты прогноза. Проверка при испытаниях на образцах и конструкциях показала достаточно высокую точность предложенной методики, хотя реальные процессы в деформируемом материале сложнее, чем может описать математическая модель. Поэтому в качестве рабочих (методика МА-ПРН/ТКУ–78 от 19.06.2002 г.) погрешностей оценки состояния материала приняты следующие: $\pm 15\%$ с вероятностью 95 %.

Вопрос оценки остаточного ресурса для материалов с эксплуатационной наработкой является весьма актуальным [14]. Для материалов, подвергающихся циклическому нагружению с известными параметрами цикла, методика расчета остаточного ресурса известна. Для прочих материалов, особенно подвергнувшихся действию множества трудно учитываемых факторов в процессе эксплуатации, требуется определение параметров, которые имеют устойчивую закономерность изменения во времени и могут служить для определения их остаточного ресурса. Одним из таких параметров может служить интегральный показатель поврежденности материала $\Delta W_{\text{п}} = 1 - P_{\text{повр}}/P_{\text{исх}}$ [18], определенный по результатам испытаний материалов с известной эксплуатационной наработкой, где $P_{\text{повр}}$ — параметр, отражающий изменение некоторого свойства материала в процессе накопления повреждений по отношению к исходному $P_{\text{исх}}$.

Для получения критерия исследовали большую партию образцов с длительной наработкой из отечественных сталей 17ГС, 17Г1С, Ст20, 09Г2С и ее чешского аналога, представляющих трубопроводы из различных регионов Украины, и образцов из этих же материалов в исходном состоянии — из аварийного запаса. Критерий учитывает общие тенденции изменения структурно-чувствительных параметров вследствие наработки, установленные при АЭ испытаниях, АЭ сканировании, испытаниях на ударную вязкость, методом ЛМ-твердости и взвешиванием малых проб в жидкости. При оценке результатов, полученных перечисленными методами, для каждого был выбран собственный параметр P , отражающий изменение свойств материала вследствие наработки.



При сравнении кривых, показывающих поврежденность $\Delta W_{\text{п}}$ в зависимости от наработки для каждого из методов, оказалось, что они практически идентичны. Таким образом, удалось построить обобщенную для различных методов кривую, связывающую поврежденность $\Delta W_{\text{ср}}$ с эксплуатационной наработкой (рис. 4, а). Перестроив обобщенную кривую в координатах «поврежденность–время» и полагая, что разрушение материала произойдет по достижении им максимально возможной поврежденности $\Delta W_{\text{ср}} = 1$, получим номограмму для определения остаточного ресурса (рис. 4, б).

Наиболее существенной особенностью разработок ИЭС в области АЭ контроля [7, 19] с самого начала стало стремление автоматизировать оценку состояния конструкций, упростить информацию о состоянии конструкции на выходе АЭ системы, представив ее в численном виде. Связано это с тем, что промышленные предприятия требуют именно такой просто анализируемой информации — насколько опасно состояние конструкции, при какой нагрузке можно продолжать эксплуатацию, каков остаточный ресурс. Заказчиков редко интересуют особенности собственно акустических процессов в материале, форма и спектр сигналов, их характеристики и другие научные аспекты вопроса. Исключением являются координаты акустической активности, поскольку их знание помогает пользователям провести при необходимости дополнительный контроль опасных участков конструкции и обеспечить их своевременный ремонт.

Существуют различные способы выполнения АЭ контроля и от того, как именно он проведен, во многом зависит безопасность дальнейшей эксплуатации контролируемого объекта. К таким способам можно отнести следующие.

1. *Разовый контроль.* Как правило, проводится в процессе плановых механических испытаний объекта (для конструкций, работающих под давлением это чаще всего гидро- или пневмоиспытания). Объект нагружают от нулевой или минимальной нагрузки до величины, которая несколько превышает рабочее значение (величина перегрузки регламентируется государственной или отраслевой нормативной документацией и для сосудов давления составляет 1,25). Если в процессе испытания обнаружены источники повышенной АЭ активности, проводят анализ их опасности для данного объекта и по результатам дают заключение о возможности дальнейшей его эксплуатации и рекомендуемых эксплуатационных параметрах. Достоинством данного подхода является сравнительно низкая стоимость проведения контроля. Сама процедура контроля занимает мало времени и не требует стационарной установки датчиков и аппаратуры, и может быть выполнена с исполь-

зованием мобильных АЭ систем. Недостатками же является то, что, во-первых, при испытании требуется создание избыточной нагрузки, повышающей риск развития дефектов, во-вторых, после проведения испытания объект не контролируется. Возникновение развивающихся дефектов уже после проведения разового контроля может привести к опасной ситуации (рис. 5).

2. *Периодический контроль.* Процедура проведения аналогична разовому контролю, но повторяется с определенным интервалом. Интервал, в зависимости от объекта контроля и его результатов, может составлять от нескольких дней до нескольких месяцев. Преимуществом периодического контроля по сравнению с разовым является то, что вероятность обнаружения опасных дефектов увеличивается, появляется возможность проведения сравнительного анализа результатов проведенных испытаний и набора соответствующей статистики. Недостатком является удорожание процедуры контроля и создание неоднократных перегрузок конструкции в процессе испытаний.

3. *Мониторинг.* Наблюдение в течение некоторого времени состояния объекта контроля при его работе в эксплуатационном режиме. Основные преимущества — наблюдение не требует изменения рабочих параметров и специального нагружения конструкции, упрощается процедура контроля и снижается его стоимость. Работа без перегрузок, требуемых при обычных испытаниях, продлевает срок службы конструкции. Недостатками являются, во-первых, меньшая вероятность обнаружения дефектов, поскольку отсутствуют перегрузки, создаваемые при разовых испытаниях именно для активизации роста дефектов, во-вторых, отсутствие контроля за состоянием объекта после завершения мониторинга, как и при разовых или периодических испытаниях.

4. *Непрерывный мониторинг.* Отсутствуют недостатки, отмеченные в трех предыдущих пунктах. Акустическая активность отслеживается постоянно, оснащение систем мониторинга средствами автоматизации позволяет оперативно, в реальном времени получать информацию о состоянии контролируемого объекта и своевременно предотвращать опасные ситуации (рис. 6). Сдерживающим фактором при внедрении является высокая стоимость систем непрерывного АЭ мониторинга, связанная с необходимостью стационарной установки датчиков, кабелей, измерительного оборудования, оснащения пульта оператора, обучения персонала и т. д.

За последние 20 лет с применением систем семейства ЕМА испытано более 1000 объектов в Украине, России и Польше. Эффективность метода показана при оценке состояния трубопроводов, емкостей, корпусов различных агрегатов, фермовых конструкций, элементов авиационных и кос-



мических изделий, сосудов, работающих под давлением. Специалистами отдела технической диагностики ИЭС выполнен комплекс научно-исследовательских и организационных работ, ускоривший создание теоретических предпосылок в области диагностики и прогнозирования состояния материалов конструкций, а также практического применения этих разработок. Совместными усилиями ученых и разработчиков контроль состояния конструкций из трудоемкого и малоудобного процесса постепенно превращается в автоматизированный, более доступный и эффективный.

Особенности АЭ диагностики промышленных конструкций в сравнении с испытаниями образцов в лабораторных условиях связаны с рядом факторов:

- высокой зашумленностью многих производств, что потребовало разработки высококачественной аппаратуры с возможностями частотной и параметрической фильтрации полученных при испытаниях сигналов АЭ;

- невозможностью проведения полного цикла нагружения (от полного отсутствия нагрузки до разрушения объекта), что потребовало создания технологии прогноза разрушающей нагрузки при работе материала в упругой области или при постоянном уровне текущей нагрузки;

- неполной информацией об объекте контроля (иногда неизвестна даже марка материала, из которого изготовлена конструкция), что потребовало создания универсальных алгоритмов прогноза разрушающей нагрузки, ориентированных не на материал, а на поврежденность конструкции;

- ограничениями во времени, накладываемыми на проведение испытаний, поскольку необходимо согласовывать их с производственными процессами, что потребовало создания алгоритмов автоматизации настройки АЭ систем и их эффективной коррекции в реальном времени.

Технология прогноза разрушающей нагрузки, реализованная в программном обеспечении для систем ЕМА-3, позволяет проводить оценку состояния материала промышленных изделий оперативно, в режиме реального времени. При этом активность АЭ показывает наличие в материале повреждений в процессе испытаний, кластерный анализ позволяет определить опасные места. Кластерный анализ работает по принципу группировки в отдельный блок АЭ событий с близкими координатами, а задание параметров кластеризации может быть выполнено АЭ системой автоматически. Прогноз разрушающей нагрузки для каждого кластера выполняется отдельно.

Непрерывный АЭ мониторинг. Сегодня при разработке и совершенствовании оборудования для АЭ мониторинга важно понимать, что это прежде всего информационная система, интеллектуальные возможности которой предоставляет

программное обеспечение. Современная система мониторинга является органичной частью общей информационной системы предприятия и постоянно обеспечивает персонал и руководство предприятия самыми свежими данными о состоянии объектов контроля, оперативно оценивает ситуацию и при необходимости предупреждает об опасности. Основные принципы разработки такой системы и ее архитектура должны соответствовать актуальному уровню задач технической диагностики и методов их решения.

При этом система должна быть интеллектуальной, т. е. решать самостоятельно поставленные перед ней задачи, современной, т. е. использовать наиболее передовые технологии, гибкой, т. е. легко адаптироваться под новые задачи.

Работа созданных автоматизированных систем непрерывного мониторинга базируется на применении АЭ как основного средства диагностики, позволяющего реализовать полный контроль изделий больших размеров и получить информацию из труднодоступных мест. Переход от единичных испытаний к контролю в масштабе цехов и заводов поставил задачи эффективной передачи результатов измерений, обмена данными в реальном времени и взаимодействия разнородных информационных устройств. Использование современных сетевых технологий, протокола ТСР/ІР, стандарта XML [9] позволяет с минимальными затратами развертывать систему непрерывного мониторинга, поэтапно подключая все новые участки контроля к уже задействованным. При этом, как показывает накопленный опыт, контролировать можно не только прочность конструкции, но и технологические процессы, связанные с ее функционированием. Таким образом, разработанные системы АЭ мониторинга представляют собой комплексное решение задачи контроля безопасности производства на всех этапах.

В настоящее время постоянно функционируют двенадцать систем непрерывного АЭ мониторинга ЕМА-3С. Контролируются четыре хранилища ST аммиака Одесского припортового завода, объекты двух цехов производства аммиака и трубы аммиакопровода на двух мостовых переходах, в том числе на километровом переходе через р. Днепр возле Днепропетровска.

Созданию таких систем предшествовала серьезная работа большой группы специалистов: сотрудуников ИЭС, служб технического надзора и лабораторий технической диагностики предприятий, на которых происходило внедрение.

Объекты Одесского припортового завода после введения систем мониторинга в штатную эксплуатацию по заданию предприятия находятся под наблюдением посредством сети Интернет. Современные компьютерные технологии позволяют доставлять информацию по контролю объектов



мониторинга непосредственно на рабочий стол специалистам, участвующим в принятии решения об их состоянии. Такая технология позволяет анализировать информацию по эксплуатации систем мониторинга ОПЗ в реальном времени специалистам ИЭС. Аналогичным образом специалисты ПО «Укрхимтрансаммиак» получают и анализируют информацию по состоянию мостового перехода трубы аммиакопровода через р. Днепр. Имеется возможность и серьезные перспективы организации централизованного контроля всей отрасли, связанной с производством аммиака как на стадии его транспортировки, так и на стадии переработки.

Работа по внедрению систем мониторинга состоит, помимо монтажа оборудования, установки датчиков и прокладки коммуникаций, в создании и отладке программной архитектуры систем мониторинга и алгоритмов оценки состояния объектов контроля, выборе и разработке средств и способов обмена данными, обеспечивающими непрерывный мониторинг, их тестировании, корректировке по результатам опытной эксплуатации и, в конечном счете, передаче системы в штатную эксплуатацию. Накопленный опыт и уже разработанные аппаратные и программные средства, технологии и технические решения позволяют во многом сократить объемы работ по внедрению мониторинговых систем на новых, ранее не контролируемых промышленных объектах, и обеспечить эффективную оценку и прогноз их состояния [15, 20].

Нормативная база и подготовка специалистов. С развитием и распространением методов диагностики возникла потребность в создании центра, который явился бы специализированным переходным звеном между промышленностью и государственными органами, издающими нормативную документацию по методам регламентных испытаний конструкций. В 1993 г. для решения этой задачи, а также для координации работ по контролю за состоянием конструкций усилиями трех ведомств — Госстандарта Украины, Госнадзорохрантруда Украины и Академии наук Украины — на базе ИЭС создан Технический комитет по стандартизации «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» (ТК-78). В составе Комитета в рамках секции по технической диагностике сварных конструкций организовано направление по технической диагностике, созданы рабочие подкомитеты, к управлению которыми привлечены ведущие специалисты отраслей. Созданный комитет осуществляет работы во всех отраслях промышленности. Теперь испытания и оценка состояния материалов конструкций и сооружений в Украине находятся под наблюдением и контролем ТК-78. Одним из основных направлений деятельности Комитета является обеспечение нор-

мативной базы, создание стандартов и методик в области контроля.

Широкая разработка новых средств диагностирования на основе метода АЭ диктует необходимость создания как универсальных нормативных документов первого национального уровня — ДСТУ, независимо от конкретных моделей диагностических средств, так и специфических отраслевых: СОУ — стандартов организаций, СТУ — стандартов научных и инженерных организаций, в соответствии с ДСТУ 1.0:2003 — «Национальная стандартизация. Основные положения». К первому уровню относятся следующие разработанные документы:

– ДСТУ 4046–2001. «Оборудование технологическое нефтеперерабатывающих, нефтехимических и химических производств», регламентирующий требования к методике испытаний на прочность сосудов и трубопроводов с использованием АЭ метода контроля;

– ДСТУ 4223–2003. «Котли, посудини під тиском і трубопроводи. Технічне діагностування. Загальні вимоги», в котором отражены специфические аспекты технологического процесса АЭ диагностирования указанных объектов;

– ДСТУ 4227–2003. «Настанови щодо проведення акустико-емісійного діагностування об'єктів підвищеної небезпеки», в котором приведены конкретные требования к подготовке, проведению АЭ диагностирования и принятию решения о техническом состоянии объекта по результатам проведенной АЭ процедуры.

Документы других уровней в основном имеют специфическую отраслевую направленность и выпущены ТК-78.

Всего Комитетом было выпущено более 20 отраслевых нормативных документов, в частности:

– МДУ 016/10–2002. Багатоканальні акустико-емісійні діагностичні комплекси. Методика державної метрологічної атестації;

– Методика аттестации многоканальной системы акустико-эмиссионной диагностики по определению разрушающей нагрузки. № 2. ТК-78. — Изд-во «Индпром». — Киев. — 2002. — 18 с.

– МР 50.01–2003. Методические рекомендации по акустико-эмиссионному диагностическому контролю объектов газохимических производств;

– СТП 50.01–2000. Технічна діагностика. Котли, посудини під тиском і трубопроводи. Акустико-емісійний метод контролю;

– СТП 50.07–2006. Методичні рекомендації з акустико-емісійного діагностування обладнання основних виробництв хімічної, нафтохімічної та нафтогазопереробної промисловості. Загальні вимоги;

– СОУ 50.06–2006. Технічна діагностика. Вимоги до підготовки і атестації персоналу з акустико-емісійного контролю та діагностування промислових об'єктів;



– Інструкція експертного обстеження (технічного діагностування) стану металу посудин, що працюють під тиском, при використанні акустико-емісійного методу контролю (2008);

– Інструкція експертного обстеження (технічного діагностування) стану металу трубопроводів пари та гарячої води при використанні акустико-емісійного методу контролю (2011);

– Методика періодичного акустико-емісійного моніторингу газопроводів (2011).

Созданные и разрабатываемые нормативные документы позволяют расширить область приме-

нения АЭ на производстве, доказывая тем самым его эффективность и одновременно повышая безопасность эксплуатации ответственного оборудования.

С расширением сферы применения метода АЭ вплотную встал вопрос о подготовке кадров в данной области. Недостаточное количество специалистов по диагностике материалов в условиях постоянно растущих требований к прочности и надежности конструкций вызвало необходимость организации их планомерной подготовки. Рассматривая эту проблему как одну из составных частей проблемы обеспечения надежности и безопасности эксплуатации конструкций и учитывая, что подавляющее большинство их изготавливается с применением сварки, была организована подготовка специалистов в области технической диагностики на базе крупных учебных центров страны. Начиная с 1990 г., совместными усилиями ИЭС и Киевского политехнического института при ряде вузов страны, включая НТУУ КПИ, на базе специальности «Оборудование и технология сварочного производства» была создана новая специализация 12.05.04 «Диагностика и прочность сварных конструкций». Предусмат-



Рис. 1. Лабораторные испытания образцов с применением системы ЕМА-2 (а); контролируемые барабаны котла тепловой электростанции в г. Варшава и первый портативный АЭ прибор для их контроля (1991 г.) (б); демонстрация первого образца системы ЕМА-3 (в)



Рис. 2. Современный вариант системы ЕМА-3 перед проведением высокотемпературного испытания (а); датчики системы ЕМА-3 при гидроиспытаниях трубы (б); датчики АЭ на образце из трубной стали (в); специальный стенд ИЭС для АЭ испытаний конструкций (г); образец, нагретый до 820 °С при высокотемпературных АЭ испытаниях (д)

ривалась подготовка специалистов достаточно широкого профиля для работы в области диагностики технического состояния и прогнозирования ресурса сварных конструкций. Следует отметить, что указанная специализация не получила достаточно полного последующего развития, все ограничилось введением дополнительных дисциплин к существующей специальности по сварным конструкциям. В 2007 г. ВАК Украины созданы при ИЭС и Физико-механическом институте им. Г. В. Карпенко НАН Украины два специализированных Ученых совета по защите кандидатских и докторских диссертаций по специальности 05.02.10 «Диагностика материалов и конструкций» (рис. 7).

За рубежом подготовке контролирующего персонала уделяется исключительно важное внимание на государственном уровне, хотя непосредственный контроль во многих случаях осуществляют частные фирмы, например TUV в Германии и других странах. TUV, кроме контролеров, го-

товит также технических экспертов, на которых возложена ответственность за принятие решения о возможности дальнейшей эксплуатации конструкций по результатам контроля. В странах СНГ и в Украине подготовка специалистов в области контроля также имеет определенную специфику, так как именно контролеры в этих странах должны давать заключение о состоянии конструкций и определить срок ее дальнейшей эксплуатации. Такая постановка задачи требует введения в программу обучения курса технической диагностики с понятием прогнозирования состояния конструкций с заданной вероятностью, что предусматривает соответствующая нормативная документация и, в частности, ГОСТ 20911–89.

С учетом изложенного выше в Украине по специальности «АЭ контроль» готовятся специалисты трех уровней. Первый и второй готовят специалистов по неразрушающему контролю с применением АЭ. При этом решение о состоянии контролируемого объекта принимается на основании

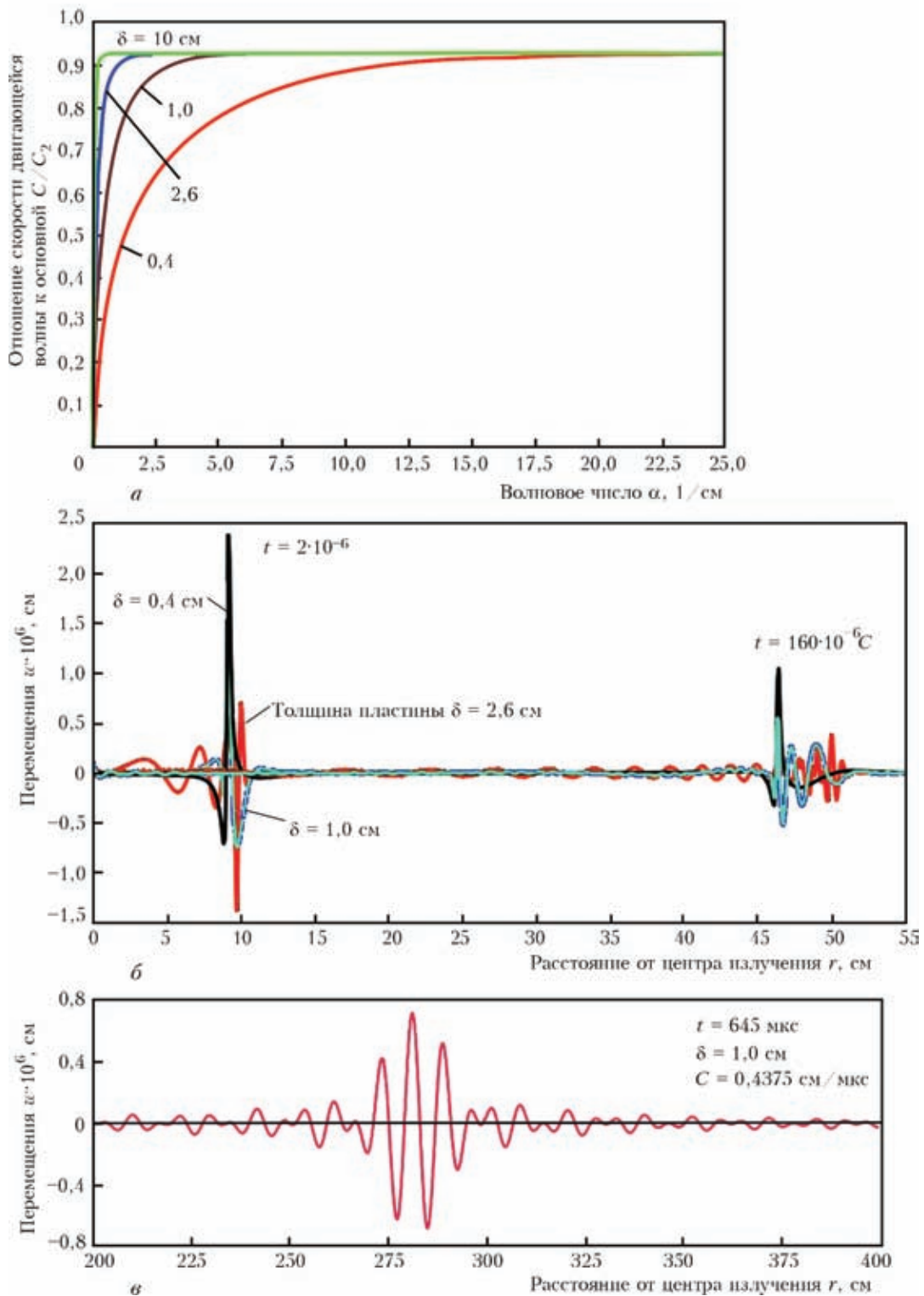


Рис. 3. Пример спектра волн (а) и АЭ сигналов для пластин разной толщины (б, в)

традиционной нормативной документации или специалистами, прошедшими обучение с курсом технической диагностики. Третий уровень подготовки выпускает специалистов, способных принять решение о состоянии объекта на основании показаний диагностической АЭ аппаратуры. В программу подготовки специалистов третьего уров-

ня входит курс технической диагностики, даются более глубокие представления об АЭ и технологии контроля на ее основе. Эту работу проводят специальные центры на государственной основе.

В 1994 г. на базе ИЭС открылись курсы подготовки специалистов по технической диагностике для специалистов, уже имеющих опыт в об-

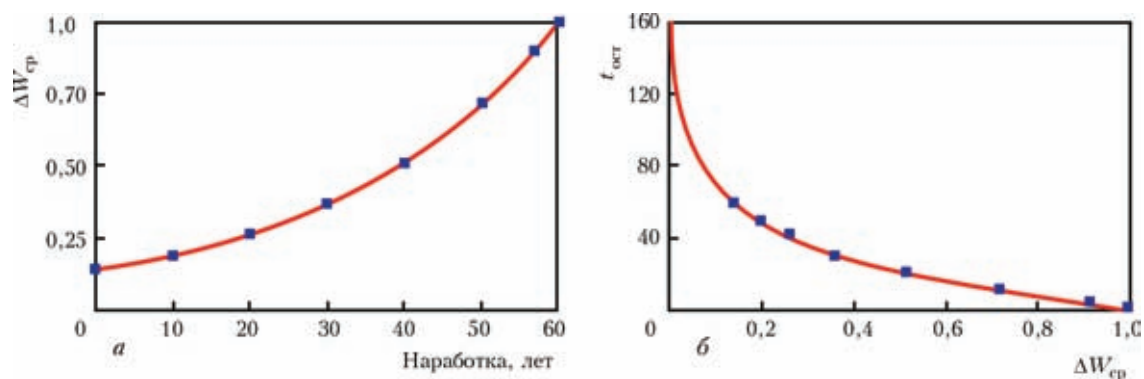


Рис. 4. Осредненная кривая поврежденности ΔW_{cp} по данным различных методов (а) и номограмма для определения остаточного ресурса трубопроводов $t_{ост}$ по известной поврежденности (б)



Рис. 5. Обследование подземного перехода газопровода «Ефремовка–Диканька–Киев» диаметром 1020 мм через автомобильную дорогу Киев–Харьков (305,6 км) (а); датчики АЭ при контроле газопровода распределительной станции (б); датчики АЭ на трубах теплотети (в); типовое состояние узла теплотети (г); аммиачный холодильник, при контроле зарегистрирован высокий уровень непрерывной АЭ и обнаружена течь (д); объекты производства карбамида ОПЗ, для которых выполняется периодический контроль (е)

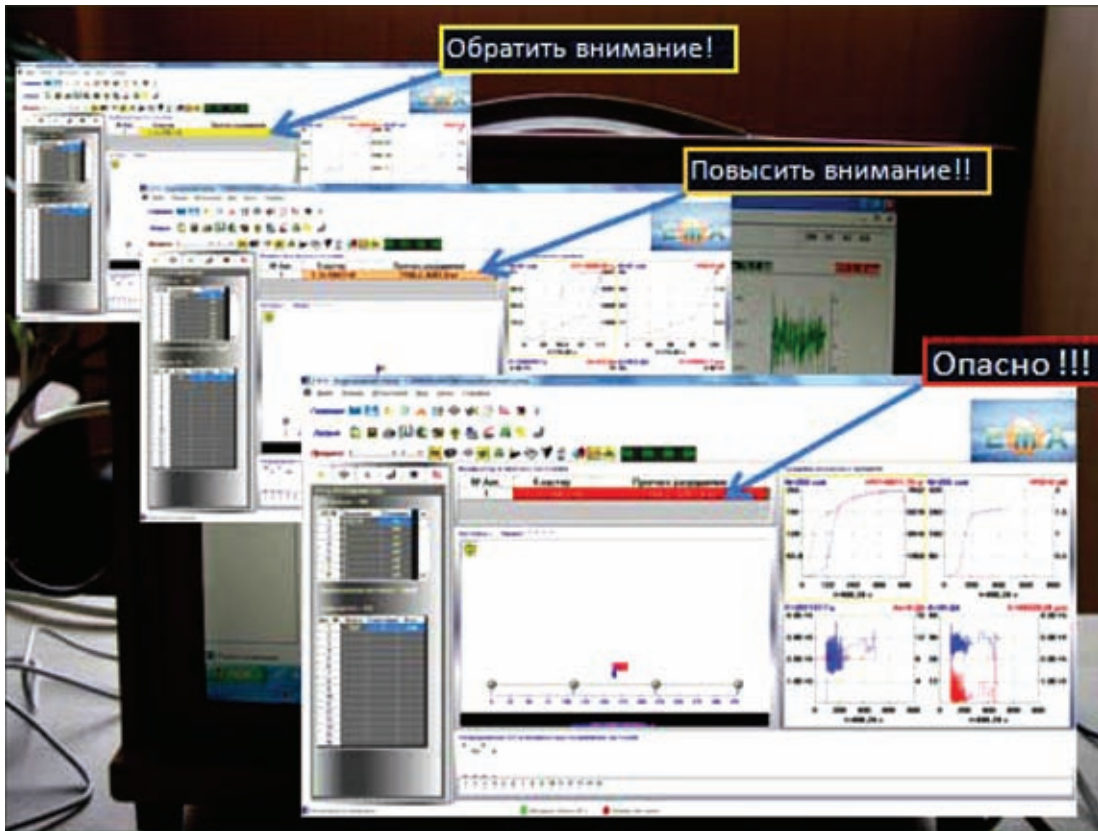


Рис. 6. Три предупреждения, генерируемые системой ЕМА-3 (показаны стрелками)



Рис. 7. Слушатели курсов по подготовке специалистов в области АЭ контроля (а); академик Б. Е. Патон открывает заседание ТК-78 (б)

ласти контроля и работающих в различных областях промышленности. С 1998 г. эти курсы начали работать под учебно-методическим контролем Госгорпромнадзора Украины.

Перспектива развития АЭ технологий. Рассмотрим общемировые тенденции в разработке и применении АЭ технологии при контроле состояния конструкций и сооружений. В настоящее время понятие «интеллектуальная конструкция», например, по отношению к мостам употребляется все чаще и подразумевает конструкции, которые сами определяют, в каком состоянии они находятся, и можно ли продолжать их эксплуатацию. Такие конструкции начали появляться в США, Финляндии и в Украине.

Интеллектуальные системы оценки состояния конструкций и сооружений, выполненные на современном уровне, должны обеспечить следующие основные функции:

- измерение, обработку и представление с заданной степенью вероятности исходных данных, необходимых для оценки несущей способности конструкций;
- экстраполяцию полученных исходных данных в направлении принятой прогнозной координаты;
- расчет несущей способности и остаточного ресурса конструкций по поступившей прогнозной информации и дополнительной информации, характеризующей условия производства и эксплуатации конструкции;

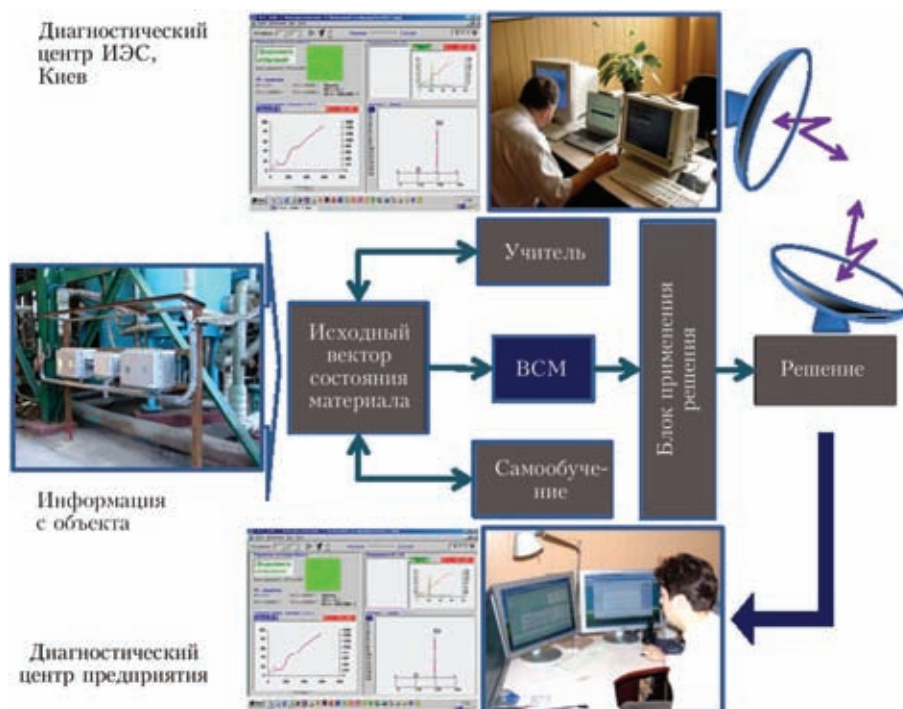


Рис. 8. Дистанционный контроль состояния конструкций

- оценку состояния конструкции и возможных последствий аварии с отработкой вариантов последствий по степени опасности;

- выбор оптимального варианта и принятие решения;

- в соответствии с принятым решением задачу команды исполнительным механизмам для изменения режима работы конструкции с целью выхода из аварийного состояния, сообщение о возможности выполнения ремонтно-восстановительных работ, необходимости частичного или полного прекращения функциональной деятельности узла или конструкции в целом;

- передачу информации о состоянии конструкции в центральный диагностический пост для принятия решения по всему объекту.

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

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

- АЕWG — Американская рабочая группа по АЭ;

- JCAE — Японский комитет по АЭ;

- EWGAE — Европейская рабочая группа по АЭ;

- GLEA — Латино-американская рабочая группа по АЭ;

- РРГАЭ — Российская рабочая группа по АЭ при Госгорнадзоре России;

- УРГАЭ — Украинская рабочая группа по АЭ при ТК-78.

Указанные рабочие группы проводят необходимые исследования в направлении АЭ, создают и распространяют необходимую нормативную документацию, проводят научные и практические конференции и семинары. С целью придания работам по АЭ контролю большего значения и усиления их координации при 135 комитете ИСО по неразрушающему контролю создан подкомитет №9 «Acoustic emission testing» с центром, расположенным в Бразилии, который в 2006 г. приступил к координации работ в области применения АЭ при контроле и испытании конструкций и сооружений.

В Украине в настоящее время существует понимание на государственном уровне важности работ в области технической диагностики, в связи с чем многие из них, в частности, работы по развитию средств и технологий АЭ контроля, выполняются в рамках Целевой комплексной программы НАН Украины «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин». Таким образом, на сегодня созданы многие из необходимых условий для развития метода АЭ и внедрения его на производстве — государственная поддержка, нормативная база, оборудование и технологии, подготовка кадров. Внедрение систем непрерывного АЭ мо-



нитинга на ряде промышленных предприятий стало свершившимся фактом и показало высокую эффективность разработанных технологий, позволяющую повысить безопасность эксплуатации дорогостоящего оборудования и обеспечить предприятиям, использующим эти технологии, существенную экономию средств на плановые остановки, ремонты и периодический контроль.

Стремительное развитие средств контроля конструкций, особенно применяющих АЭ технологию, и то внимание, которое уделяется этому вопросу мировым сообществом, дает перспективу широкого применения АЭ для создания интеллектуальных конструкций и сооружений, которые с заданной точностью и вероятностью сами будут сообщать о своем состоянии и предлагать меры выхода из затруднительных ситуаций. Другими словами, системы непрерывного мониторинга, использующие интегральные методы контроля и, в частности АЭ, будут все шире применяться при контроле потенциально опасных в эксплуатации, а затем, по мере упрощения технологии их создания, и в обычных промышленных конструкциях. Следует также предположить расширение сети специализированных центров контроля эксплуатирующихся конструкций. Такие центры будут укомплектованы специалистами высокой квалификации, а современные цифровые технологии и средства коммуникации позволят им проводить мониторинг и оценивать состояние конструкций дистанционно, находясь от объекта контроля на любом расстоянии. Прогресс в развитии данной технологии позволит в ближайшем будущем подойти к созданию систем на основе АЭ, которые не только контролируют конструкции, но и управляют процессом их эксплуатации с точки зрения безопасности.

Выводы

Исследования в области АЭ, проводимые в течение длительного периода, показали эффективность метода при поиске дефектов и оценке состояния образцов и конструкций из широкого класса материалов в лабораторных и промышленных условиях, в широком диапазоне температур и при различных условиях среды.

Разработана технология, позволяющая эффективно использовать метод АЭ в условиях производства, включающая определение координат, возникающих или развивающихся при разрушении материалов конструкций дефектов, фильтрацию общего потока АЭ сигналов с целью выделить сигналы, несущие необходимую информацию о дефектах материалов, предложены и исследованы критерии кластеризации АЭ информации для последующего анализа, разработана система эталонов-учителей для выбора по данным кластеров наиболее соответствующего варианта разрушения материала.

Изучены теоретические вопросы прогнозирования разрушения на основе данных АЭ контроля и получены аналитические зависимости для алгоритмов самообучения при выполнении процедуры диагностики. Показано, что процедура принятия решения о состоянии материала может быть успешной, если наперед задана невязка между информацией, получаемой прибором АЭ, и эталоном. Выполненные исследования позволили прогнозировать разрушающую нагрузку материала на ранних стадиях разрушения.

Исследована взаимосвязь АЭ с накоплением повреждений в материале при деформировании и в процессе эксплуатации. Разработана методика оценки поврежденности и определения остаточного ресурса конструкций с эксплуатационной нагрузкой по данным АЭ контроля.

Разработки в области АЭ получили внедрение в промышленность при поиске и оценке опасности существующих и возникающих в процессе эксплуатации дефектов для широкого класса материалов и конструкций. Главным достижением является создание на базе проведенных исследований и внедрение технологии непрерывного мониторинга конструкций в процессе их эксплуатации с определением разрушающей нагрузки и остаточного ресурса материала в реальном времени. Использование передовых информационных технологий, Интернета и средств беспроводной связи обеспечивают передачу данных о состоянии материалов конструкций на любые расстояния, что позволяет контролировать работу конструкций дистанционно.

Выполненные научные разработки, созданная нормативная и методическая база, подготовка специалистов и разработанная технология контроля позволяют эффективно внедрять метод АЭ на производстве в самых разных отраслях промышленности, энергетики и транспорта.

1. *О некоторых путях построения автоматических информационно-измерительных систем для диагностики надежности сварных конструкций* / Б. Е. Патон, И. В. Кудрявцев, А. Я. Недосека, А. Е. Коротынский // Автомат. сварка. — 1974. — № 9. — С. 1—5.
2. *Применение датчиков акустической эмиссии в системе диагностики надежности сварных конструкций* / Б. Е. Патон, А. А. Грузд, Л. Ф. Харченко, Ю. Г. Куценко // Там же. — 1979. — № 5. — С. 3—10.
3. *Пеллионис П., Герев Я.* Методика и аппаратура для АЭ-контроля в процессе проверочных испытаний сосудов высокого давления ядерного реактора в Венгрии // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1991. — № 3. — С. 14—21.
4. *Чаусов Н. Г., Недосека С. А., Лебедев А. А.* Влияние вида напряженного состояния на параметры акустической эмиссии на заключительных стадиях деформирования металлов // Там же. — 1993. — № 3. — С. 18—23.
5. *Technical diagnostics — welded structures prolongation possibility of exploitation estimation* / B. E. Paton, L. M. Lobanov, A. J. Nedoseka, S. A. Nedoseka // J. of the Intern. Institute of Welding. — 2001. — 45. — P. 201—205.



6. Оценка поврежденности металла действующих газопроводов методом АЭ-сканирования / А. А. Лебедев, А. Я. Недосека, Н. Г. Чаусов, С. А. Недосека // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2001. — № 1. — С. 8—12.
7. Патон Б. Е., Лобанов Л. М., Недосека А. Я. Техническая диагностика: вчера, сегодня и завтра // Там же. — 2003. — № 4. — С. 6—10.
8. О непрерывном мониторинге хранилищ жидкого аммиака / А. Я. Недосека, С. А. Недосека, М. А. Яременко, А. А. Елкин и др. // Автомат. сварка. — 2004. — № 2. — С. 10—17.
9. Недосека С. А. К стандартизации применения XML (eXtensive Markup Language) в автоматизированных системах АЭ диагностики // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2005. — № 2. — С. 9—16.
10. Недосека С. А., Недосека А. Я. Диагностические системы семейства «ЕМА». Основные принципы и особенности архитектуры (Обзор) // Там же. — 2005. — № 3. — С. 20—26.
11. Недосека А. Я., Недосека С. А., Волошкевич И. Г. О волнах Рэлея в пластинах ограниченной толщины // Там же. — 2006. — № 3. — С. 3—8.
12. Недосека С. А. Прогноз разрушения по данным акустической эмиссии // Там же. — 2007. — № 2. — С. 3—9.
13. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностика сварных конструкций. — Киев: Индпром, 2008. — 815 с.
14. Недосека А. Я., Недосека С. А. Акустическая эмиссия и ресурс конструкций // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2008. — № 2. — С. 5—19.
15. Об опыте применения АЭ технологии при непрерывном мониторинге оборудования Одесского припортового завода / А. Я. Недосека, С. А. Недосека, М. А. Яременко и др. // Там же. — 2008. — № 4. — С. 85—95.
16. Недосека А. Я., Недосека С. А. Акустическая эмиссия и квантовый характер разрушения материалов // Там же. — 2009. — № 3. — С. 11—17.
17. 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.
18. Недосека С. А., Недосека А. Я. Комплексная оценка поврежденности и остаточного ресурса металлов с эксплуатационной наработкой // Там же. — 2010. — № 1. — С. 9—16.
19. Недосека А. Я., Недосека С. А. Об оценке надежности эксплуатирующихся конструкций (состояние вопроса и перспектива развития) // Там же. — 2010. — № 2. — С. 7—17.
20. Недосека А. Я., Недосека С. А., Яременко М. А. Непрерывный мониторинг магистральных газопроводов и газокomppressorных станций методом акустической эмиссии // Там же. — 2011. — № 4. — С. 3—13.

Поступила в редакцию
18.01.2012



СВАРКА и РЕЗКА - 2012

12-я Международная специализированная выставка

10–13 апреля 2012

Минск

ЗАО «Минск-Экспо»

Тематика выставки

- материалы для сварки, наплавки и пайки
- оборудование и технологии сварки, резки, наплавки, пайки и термообработки
- источники питания и системы управления сварочным оборудованием
- оборудование для орбитальной сварки и обработки труб
- электронно-лучевая, лазерная, плазменная сварка и резка
- автоматизированные комплексные системы и агрегаты для сварки и резки
- приборы для неразрушающего контроля сварных соединений
- научное и информационное обеспечение сварки
- система подготовки, переподготовки и аттестации сварщиков
- охрана труда и экологическая безопасность в сварочном производстве
- сертификация сварочного оборудования

Одновременно с выставкой «Сварка и Резка» будут работать выставки «Защита от коррозии. Покрытия» и «Машиностроение».

Контакты: тел./факс: +375 17 226 98 58, e-mail: e_fedorova@solo.by



УДК 620.179.16:620.179.17

РАЗВИТИЕ КОНЦЕПЦИЙ СОЗДАНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ТИПА. РЕЖИМ ВОЗБУЖДЕНИЯ. ЧАСТЬ 1.

Г. М. СУЧКОВ, д-р техн. наук, С. В. ХАЩИНА (Нац. техн. ун-т «ХПИ»),
О. Н. ПЕТРИЩЕВ, д-р техн. наук (Нац. техн. ун-т Украины «КПИ»)

Разработан принцип и метод расчета ультразвуковых преобразователей электромагнитного типа для систем неразрушающего контроля и технической диагностики металлопроката, для первичных преобразователей в устройствах электрического измерения неэлектрических величин, для аппаратуры экспериментального исследования физико-механических и структурных параметров металлов. Показана возможность определения необходимых характеристик преобразователя через функцию «частотная характеристика преобразователя».

The principle and method of calculation were developed for ultrasonic transducers of electromagnetic type for systems of NDT and technical diagnostics of metal rolled stock, for primary transducers in devices for electric measurement of nonelectric values, for instrumentation for experimental investigation of physico-mechanical and structural parameters of metals. The possibility of determination of the required characteristics of the transducer through the function of «transducer frequency characteristic» is shown.

Повышение требований к качеству промышленной продукции предопределило интенсивное развитие средств НК материалов и изделий. Их основу составляют приборы, в которых реализован контактный метод УЗ контроля [1]. В то же время необходимо контролировать изделия с загрязненной, корродированной поверхностью или с покрытиями (краска, полимерные пленки и другие изоляционные покрытия), проводить дефектоскопию горячих и «холодных» изделий, выполнять высокоскоростной контроль, дефектоскопию с низкими эксплуатационными затратами и т. д. [1–3]. Заполнить образовавшуюся нишу возможно за счет применения приборов, использования контактной жидкости в которых не предусмотрено. По результатам известных теоретических, экспериментальных и внедренческих работ [1–11] установлено, что наиболее эффективными среди них в настоящее время является метод и средства, использующие электромагнитный способ возбуждения и приема УЗ колебаний. Этот способ НК зародился на стыке нескольких научных направлений, имеющих различную физическую сущность. Для его описания необходимо применять аппарат электродинамики и термодинамики, теории упругости, ферромагнетизма, акустики, материаловедения, а применение распространяется на дефектоскопию, толщинометрию, определение физико-механических свойств материалов, измерительные приборы с ультразвуковыми преобразователями. Многогранность и объем требуемых научных и технических решений привели к значительным трудностям при создании приборов и устройств, использующих электромагнитный способ на прак-

тике [1]. Анализ литературных источников показал, что упомянутые трудности обусловлены недостаточной проработкой теории, которая могла бы при минимуме ограничительных положений обосновать основные концепции конструирования преобразователей электромагнитного типа.

Обоснование исходных положений. Термином «УЗ преобразователь электромагнитного типа» авторы обозначают систему с распределенными параметрами, состоящую из источника постоянного магнитного поля, источника переменного магнитного поля и некоторого объема металла, где происходят процессы преобразования энергии электромагнитного поля в энергию упругих колебаний частиц среды. Указанные устройства используют магнитоstrictionные эффекты или пондеромоторное действие электромагнитного поля и применяются для возбуждения и регистрации УЗ волн в ферромагнетиках и в металлах неферромагнитной группы.

В режиме возбуждения УЗ упругих возмущений различные конструкции преобразователей электромагнитного типа реализуют алгоритм преобразования сигналов, который можно представить следующим образом:

$$U_{\text{вх}}(t) \rightarrow I^*(t) \rightarrow \vec{H}^*(x_k, k) \rightarrow \left(\begin{array}{c} C_{ijkl}^H, \rho_0, r_{nm} \\ m_{pqkl}, \mu_{rs}^\epsilon \end{array} \right) \rightarrow \vec{u}(x_m, t),$$

$$\uparrow$$

$$\vec{H}^0(x_k), \quad (1)$$

где $U_{\text{вх}}(t)$ — разность электрических потенциалов на электрическом входе (на клеммах электрического контура) УЗ преобразователя электромагнитного типа; $I^*(t)$ — изменяющийся во времени (символ t) электрический ток в электрическом контуре



преобразователя; $\vec{H}^*(x_k, t)$ — вектор напряженности переменного магнитного поля, которое создается электрическим контуром УЗ преобразователя в точке с координатами x_k ($x_k = (x_1, x_2, x_3)$ — координаты точки в праввинтовой (физической) системе координат); $\vec{H}^0(x_k)$ — вектор напряженности постоянного поля подмагничивания — для металлов неферромагнитной группы ориентация этого поля определяет направление вектора объемной плотности сил Лоренца в точке с координатами x_k , для ферромагнетиков вектор $\vec{H}^0(x_k)$ определяет структуру матрицы пьезомагнитных констант и характер напряженно-деформированного состояния металла в ближайшей окрестности точки с координатами x_k .

В круглых скобках в алгоритме (1) записаны физико-механические константы металла в области существования переменного и постоянного магнитных полей: c_{ijkl}^H — компонент тензора модулей упругости, экспериментально определяемых в режиме постоянства напряженности магнитного поля; ρ_0 — плотность металла; r_{mn} — компонент тензора электрической проводимости металла; m_{pqkl} — компонент тензора магнитоэлектрических констант; μ_{rs}^E — компонент тензора магнитной проницаемости, экспериментально определяемый в режиме постоянства деформаций при заданном уровне напряженности поля подмагничивания.

В области существования магнитных полей $\vec{H}^*(x_k, t)$ и $\vec{H}^0(x_k)$ в металле формируются деформации. Энергия из области формирования уносится упругими волнами. Вектор смещения материальных частиц металла в момент времени t в точке с координатой x_m за пределами области существования переменного магнитного поля в алгоритме (1) обозначен символом $\vec{u}(x_m, t)$.

Если электрический вход УЗ преобразователя электромагнитного типа определяется конструктивно — это клеммы электрического контура источника переменного магнитного поля, то относительно механического выхода необходимо принять некоторые положения. Выходной величиной, т. е. результатом работы УЗ преобразователя, являются смещения материальных частиц — векторы $\vec{u}(x_m, t)$ в объеме металла. По этой причине под механическим выходом УЗ преобразователя электромагнитного типа следует понимать любую точку с координатами x_m , расположенную за пределами области существования переменного магнитного поля.

Формально можно говорить, что переменное магнитное поле УЗ преобразователя электромагнитного типа существует во всем пространстве и обращается в нуль в бесконечно удаленной точке.

Вместе с тем необходимо принимать к сведению и то, что уровни напряженности переменного магнитного поля резко уменьшаются по мере удаления от источника. На расстояниях, больших двух-трех характерных размеров источника переменного магнитного поля, напряженность этого поля уменьшается настолько, что оно становится несущественным на фоне внутреннего магнитного поля, которое возникает в процессе деформирования металла. Таким образом, процесс преобразования энергии электромагнитного поля в энергию упругих колебаний материальных частиц металла локализован в объеме, размеры которого измеряются единицами характерных размеров электрического контура источника переменного магнитного поля. При расчетах границы этого объема, т. е. области существования переменного магнитного поля, приобретают смысл «технической бесконечности».

Термином «математическая модель преобразователя в режиме возбуждения УЗ волн» будем определять функцию, которая описывает процесс преобразования $U_{вх}(t) \rightarrow \vec{u}(x_m, t)$. Если воздействие, т. е. разность потенциалов $U_{вх}$, является импульсным сигналом, то эта функция имеет смысл импульсной характеристики. В случае гармонического воздействия математической моделью преобразователя является его частотная характеристика.

Предположим, что уровни постоянного магнитного поля и значения компонентов вектора напряженности переменного магнитного поля удовлетворяют неравенству:

$$\int_{V^*} H_m^0(x_k) H_m^0(x_k) dV^* \gg \int_{V^*} H_m^*(x_k, t_0) H_m^*(x_k, t_0) dV^*, \quad (2)$$

где координаты точки $x_k \in V^*$, а V^* — конечный объем области существования переменного магнитного поля, в котором сосредоточена основная доля его энергии; t_0 — любой, произвольно зафиксированный момент времени.

Такое соотношение уровней напряженностей магнитных полей дает возможность утверждать, что преобразование $U_{вх}(t) \rightarrow \vec{u}(x_m, t)$ является линейным. Общеизвестно, что для всех линейных физических систем справедлив принцип суперпозиции. Если известна реакция системы на гармоническое воздействие, то сумма реакций будет соответствовать сумме гармонических воздействий. Так как импульсный сигнал может быть представлен суммой гармонических сигналов, то можно утверждать, что по известной реакции линейной физической системы на гармоническое воздействие всегда можно определить отклик этой системы на импульсное воздействие. Последнее позволяет отказаться от постановки сложной в ре-



шении и в интерпретации полученных результатов нестационарной задачи об импульсном возбуждении упругих возмущений и перейти к стационарной постановке, в которой воздействие на систему и ее отклик предполагаются гармоническими изменяющимися во времени с частотой ω по закону $e^{i\omega t}$ ($i = \sqrt{-1}$).

Если на электрическом входе УЗ преобразователя электромагнитного типа действует разность электрических потенциалов $U_{вх} = U_0 e^{i\omega t}$, где U_0 — амплитудное значение, то на его механическом выходе формируется отклик $\vec{u}(x_k, t) = \vec{u}(x_k, \omega) e^{i\omega t}$, где $\vec{u}(x_k, \omega)$ — амплитуда гармонически изменяющегося во времени вектора смещения материальных частиц.

При этом между амплитудами воздействия и отклика преобразователя существует линейная зависимость следующего вида:

$$\vec{u}(x_k, \omega) = U_0 \vec{W}(x_k, \omega, P),$$

где компоненты векторной функции $\vec{W}(x_k, \omega, P)$, т. е. величины $W_m(x_k, \omega, P)$, имеют смысл частотных характеристик УЗ преобразователя электромагнитного типа в режиме возбуждения m -го компонента вектора смещения материальных частиц металла; P — набор геометрических и физико-механических параметров преобразователя.

Очевидно, что основной целью математического моделирования преобразователей электромагнитного типа в режиме возбуждения УЗ волн является построение функции $\vec{W}(x_k, \omega, P)$, которая дает возможность определить параметры датчика.

Формулировка концепций математического моделирования преобразователей электромагнитного типа при возбуждении УЗ волн. С целью развития единого подхода к построению математических моделей УЗ преобразователей электромагнитного типа рассмотрим процессы в токопроводящем ферромагнетике при совместном воздействии на него переменного и постоянного во времени магнитных полей.

Изменяющиеся во времени смещения $u_n(x_k, t)$ материальных частиц в объеме V токопроводящего ферромагнетика удовлетворяют уравнениям движения:

$$\sigma_{mn,m} - I_n - \rho_0 \ddot{u} = 0 \quad \forall x_k \in V, \quad (3)$$

а электромагнитные поля, возникающие в среде из-за поляризационных эффектов, уравнениям Максвелла:

$$\epsilon_{lpk} - E_{k,p} + \dot{B}_l = 0 \quad \forall x_k \in V, \quad (4)$$

$$\epsilon_{lpk} H_{k,p} - J_l - \dot{D}_l = 0 \quad \forall x_k \in V, \quad (5)$$

причем компоненты векторов \vec{B} и \vec{D} удовлетворяют условиям:

$$B_{l,l} = 0 \quad \forall x_k \in V, \quad D_{l,l} - \rho^e = 0 \quad \forall x_k \in V. \quad (6)$$

В уравнениях (3)–(6) приняты следующие обозначения: σ_{mn} — компонент тензора механических напряжений; запятая между индексами — дифференцирование записанного до запятой выражения по координате, индекс которой проставлен после запятой; L_n — n -й компонент силы Лоренца; ρ_0 — плотность ферромагнетика; одна или две точки над символом физической величины обозначают первую или вторую производную по времени; ϵ_{lpk} — компонент тензора Леви—Чивиты, равный +1 или -1 при четных или нечетных перестановках чисел 1, 2, 3 (индексов l, p, k) и равный 0, когда любые два индекса из трех равны между собой; E_k и H_k — компоненты векторов напряженности электрического и магнитного полей; D_l и B_l — компоненты векторов индукции электрического и магнитного полей; ρ^e — объемная плотность свободных электрических зарядов; H_k — напряженность результирующего магнитного поля, т. е. величина $H_k(x_k, t) = H_k^0(x_k) + H_k^*(x_k) e^{i\omega t} + h_k(x_k, t)$, где $h_k(x_k, t)$ — k -й компонент вектора напряженности внутреннего магнитного поля, которое возникает в объеме деформируемого ферромагнетика. Очевидно, что векторы $H^*(x_k)$ и $H^0(x_k)$ удовлетворяют уравнениям Максвелла.

Применительно к металлам, т. е. к электропроводящим средам, можно считать, что токи смещения с компонентами поверхностной плотности \vec{D}_l в уравнении (5) ничтожно малы (по крайней мере в мегагерцовом частотном диапазоне) по сравнению с токами проводимости. К тому же следует уточнить, что дальнейшее изложение будет вестись в предположении, что плотность сторонних свободных электрических зарядов $\rho^e = 0$. Эти два обстоятельства дают все основания полагать в дальнейшем $\vec{D} = 0$.

Уравнения движения (3) и уравнения Максвелла (4)–(5) связаны между собой уравнениями состояния магнитоэластичной среды [12], которые в первом приближении можно представить в следующем виде:

$$\sigma_{mn} = c_{mnl}^H u_{k,l} - \frac{1}{2} m_{pqmn} H_p H_q, \quad (7)$$

$$B_s = M_{nsl} H_n u_{k,l} + \mu_{sm}^e H_m, \quad (8)$$

где c_{mnl}^H и m_{pqmn} — компоненты тензоров модулей упругости и магнитоэластичных констант размагнитченного ферромагнетика; μ_{sm}^e — компонент тензора магнитной проницаемости «зажатого» (недеформируемого) ферромагнетика. Для поликристаллических материалов тензоры c_{mnl}^H и m_{pqmn} являются изотропными тензорами четвертого ранга



с компонентами $c_{mnkl}^H = \lambda \delta_{mn} \sigma_{kl} + G(\delta_{mk} \delta_{nl} + \delta_{ml} \delta_{nk})$ и $m_{pqmn} = m_2 \delta_{pq} \delta_{mn} + (m_1 - m_2)(\delta_{pm} \delta_{ql} + \delta_{pl} \delta_{qm})/2$, где λ и G — константы Ламе; δ_{ij} — символы Кронекера, равные единице при одинаковых индексах i, j и равные нулю в противном случае; m_1, m_2 — экспериментально определяемые магнитоэлектрические константы, причем $m_1 \leq 1$ Н/м² и $-m_1/2 \leq m_2 < 0$.

Система уравнений (3) – (8) замыкается обобщенным законом Ома в дифференциальной форме:

$$J_i = r_{lk} (E_k + \epsilon_{kpq} \dot{u}_p B_q), \quad (9)$$

где r_{lk} — компоненты тензоров электрической проводимости ферромагнетика.

Тензоры магнитной проницаемости и электрической проводимости имеют матрицы диагонального типа. Следует заметить, что для движущейся токопроводящей среды соотношения (8) и (9) будут, в принципе, содержать добавки, величины которых обратно пропорциональны квадрату скорости распространения электромагнитных возмущений в среде. Очевидно, что в УЗ диапазоне частот этими добавками можно пренебречь.

Объемная плотность сил Лоренца определяется следующим образом:

$$L_n = \epsilon_{nrs} r_{rl} (E_l + \epsilon_{lpq} \dot{u}_p B_q) B_s. \quad (10)$$

Следовательно, совместное решение уравнений движения (3) и уравнений Максвелла (4), (5) с учетом связывающих и дополняющих их соотношений (6)–(10) дает возможность определить как упругую, так и электромагнитную составляющую единого электромагнитоупругого поля, существующего в объеме деформируемого и поляризованного постоянным магнитным полем металла.

Для упрощения представим совокупность дифференциальных уравнений (3)–(5) и дополняющих их материальных соотношений (6)–(10) в более компактной форме.

Подставим в уравнения движения (3) соотношения (7) и (10):

$$c_{mnkl}^H u_{k,m} - \frac{1}{2} m_{pqmn} (H_p H_q)_{,m} - \epsilon_{nrs} r_{rl} (E_l + \epsilon_{lpq} \dot{u}_p B_q) B_s - \rho_0 \ddot{u}_n = 0 \quad \forall x_k \in V. \quad (11)$$

С учетом сформулированных выше предположений уравнение Максвелла (5) приобретает следующий вид:

$$\epsilon_{lpk} H_{k,p} - r_{lr} (E_r + \epsilon_{rpq} \dot{u}_p B_q) = 0. \quad (12)$$

Для поликристаллических металлов с матрицей электрической проводимости диагонального типа решение системы уравнений (12) относительно компонент вектора напряженности электрического поля записывается в следующем виде:

$$E_k = \frac{1}{r_{kk}} \epsilon_{kml} H_{l,m} - \epsilon_{kpq} \dot{u}_p B_q. \quad (13)$$

По индексу k в правой части выражения (13) не суммировать.

Подставляя определенный формулой (13) компонент вектора \vec{E} в уравнения Максвелла (4), получаем дифференциальное уравнение для магнитного компонента магнитоупругого поля:

$$\epsilon_{ijk} \left[\frac{1}{r_{kk}} \epsilon_{kml} H_{l,mj} - \epsilon_{kpq} (\dot{u}_p B_q)_{,j} \right] + \dot{B}_i = 0 \quad \forall x_k \in V. \quad (14)$$

Единственность решения системы уравнений (11) и (14) обеспечивается граничными условиями для упругой и электромагнитной составляющих поля:

$$n_n \left(c_{nmkl}^H u_{k,l} - \frac{1}{2} m_{pqmn} H_p H_q + M_{mn} \right) = 0 \quad \forall x_k \in S \quad (15)$$

$$n_s (m_{nskl} H_n u_{k,l} + \mu_{sn}^e H_m - \mu_0 \tilde{H}_s) = 0 \quad \forall x_k \in S \quad (16)$$

$$\epsilon_{ijk} n_j (H_k - \tilde{H}_k) = 0 \quad \forall x_k \in S \quad (17)$$

где \vec{n} — вектор единичной нормали к ограничивающей объем V поверхности S ; M_{mn} — компонент тензора напряжений Максвелла, причем $M_{mn} = H_n B_m - (\delta_{mn} H_k B_k)/2$; μ_0 — магнитная проницаемость вакуума; H_m — компоненты вектора напряженности магнитного поля рассеяния, которое излучается в окружающее пространство деформируемым металлом, удовлетворяющие уравнению

$$\nabla^2 \vec{H} - \left(\frac{1}{c_0^2} \right) \ddot{\vec{H}} = 0 \quad \forall x_k \in (V^\infty - V)$$

в окружающем ферромагнетик пространстве (c_0 — скорость распространения электромагнитного излучения в вакууме) и обращаются в нуль на бесконечности.

При решении граничной задачи (11), (14)–(17) возникают две проблемы, которые можно кратко определить как нелинейность и связность.

Сопряженные с нелинейностью проблемы в значительной мере разрешаются с помощью метода полигармонических разложений [13]. Кроме того, в работе [14] показано, что в присутствии достаточно сильного поля подмагничивания, когда выполняется условие (2), полигармоническую магнитоупругую задачу (11), (14)–(17) можно привести к двум последовательно решаемым гармоническим граничным задачам.

Первая задача имеет смысл стационарной граничной задачи теории упругости о возбуждении гармонических волн системой внешних сил, которые распределены по объему V некоторой конечной области металла с объемной плотностью $\vec{f}^*(x_k) e^{i\omega t}$ и по поверхности S , ограничивающей этот объем, с поверхностной плотностью



$\vec{\sigma}^*(x_k)e^{i\omega t}$. Для амплитуд гармонически изменяющихся во времени полей упругих смещений и сил эта задача формулируется следующим образом:

$$c_{nmkl}^H u_{k,lm} + \rho_0 \omega^2 u_n - f_n^* = 0 \quad \forall x_k \in V, \quad (18)$$

$$n_j (c_{ijkl}^H u_{k,l} - \sigma_{ij}^*) = 0 \quad \forall x_k \in S. \quad (19)$$

При электромагнитном возбуждении УЗ волн в металлах неферромагнитной группы $f_n^* = L_n$ и $\sigma_{ij}^* = H_i^* B_j^0 - (\sigma_{ij} H_k^* B_k^0)/2$. Для ферромагнетиков $f_n^* = m_{ijm}^0 (H_i^* H_j^*)_{,m}$ и $\sigma_{ij}^* = m_{mnij}^0 H_m^* H_n^*$. При этом полагаем, что внутреннее магнитное поле не влияет на качественные и количественные характеристики процесса возбуждения УЗ волн в ферромагнетиках.

Вторая задача позволяет определить компоненты вектора напряженности внутреннего магнитного поля по найденным в результате решения граничной задачи (18), (19) компонентам $u_m(x_k)e^{i\omega t}$ вектора смещения материальных частиц ферромагнитного металла.

Формулировка этой задачи в терминах амплитуд гармонически изменяющихся во времени физических полей будет иметь следующий вид:

$$\epsilon_{mqi} \left(\frac{1}{r_u} \epsilon_{lpk} h_{k,pq} \right) + i\omega \mu_{mp}^e h_p + i\omega m_{pmkl} H_p^0 u_{k,l} = 0 \quad \forall x_k \in V^{(+)}, \quad (20)$$

$$\epsilon_{kmn} n_m (h_n - \tilde{H}_n) = 0 \quad \forall x_k \in S^{(+)}, \quad (21)$$

$$n_m (m_{pmij} H_p^0 U_{i,j} + \mu_{mn}^* h_n - \mu_0 \tilde{H}_m) = 0 \quad \forall x_k \in S^{(+)}, \quad (22)$$

где $V^{(+)}$ и $S^{(+)}$ — объем металла и ограничивающая его поверхность за пределами области приложения внешних сил; \tilde{H}_m — компоненты магнитного поля рассеяния.

Решение задачи (20)–(22) позволяет определить динамическое магнитное состояние деформируемого ферромагнетика с учетом скин-эффекта и потерь энергии, обусловленных излучением электромагнитных волн в окружающее пространство. Если не учитывать внутреннее магнитное поле, то за пределами области существования переменного магнитного поля преобразователя амплитудное значение гармонически изменяющейся во времени магнитной индукции деформируемого ферромагнетика, как следует из уравнения (8), будет определяться следующим образом: $B_s = m_{nskl} H_n^0 u_{k,l}$. Это определение динамического магнитного состояния металла противоречит фундаментальному условию отсутствия магнитных зарядов, т. е. условию $B_{m,m} = 0$. Поэтому определение динамического магнитного состояния деформируемого ферромагнетика определим как

$$B_s = m_{nskl} H_n^0 u_{k,l} + \mu_{sp}^e h_p, \quad (23)$$

где h_p — компонента вектора напряженности внутреннего магнитного поля, определенная в результате решения граничной задачи (20)–(22).

Соотношение (23) является отправным пунктом при построении математической модели преобразователя электромагнитного типа в режиме регистрации УЗ волн в ферромагнитных металлах.

Последовательное решение граничных задач (18), (19) и (20)–(22) позволяет приближенно описать напряженно-деформированное и динамическое магнитное состояние поляризованного постоянным магнитным полем ферромагнетика при локальном воздействии на него переменного магнитного поля УЗ преобразователя. Предлагаемый подход к описанию физического состояния ферромагнитного металла можно назвать методом последовательного приближения.

Деформирование в присутствии постоянного магнитного поля металла неферромагнитной группы сопровождается появлением конвективных электрических токов [15]. Амплитудное значение $j_k(x_m)$ k -й компоненты вектора поверхностной плотности этого тока определяется следующим образом:

$$j_k(x_m) = i \omega r \mu_0 \epsilon_{kmn} u_n(x_m) H_m^0(x_m), \quad (24)$$

где r — компонента шарового тензора удельной электрической проводимости, амплитуды компонентов вектора смещения которых определяются в результате решения граничной задачи (18), (19).

Выражение (24) является основополагающим при построении математической модели преобразователя электромагнитного типа в режиме приема УЗ волн, распространяющихся в металлах неферромагнитной группы.

Таким образом, решение граничной задачи (18), (19) позволяет определить смещения материальных частиц металла при локальном воздействии на него переменным магнитным полем преобразователя электромагнитного типа и построить частотную характеристику $\vec{W}(x_k, \omega, P)$, т. е. математическую модель преобразователя. Помимо этого, решения граничной задачи (18), (19) дают возможность определить динамическое электрическое и магнитное состояние деформируемого металла.

Выводы

Сформулирован концептуальный подход к решению проблемы возбуждения акустических колебаний в электропроводных ферромагнитных металлах с учетом параметров преобразователя, свойств материала, характеристик возбуждающего сигнала, содержащий уравнение движения частиц металла, уравнения Максвелла и обобщенный за-



кон Ома в дифференциальной форме для проводников с усложненными свойствами.

Определены пути решения задач по нахождению упругих смещений, возбуждаемых преобразователем электромагнитного типа в металлах ферромагнитной и неферромагнитной групп.

1. *Неразрушающий контроль*: Справ.: В 7 т. Под общ. ред. В. В. Клюева. Т.3: Ультразвуковой контроль / И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге. — М.: Машиностроение, 2004. — 864 с.
2. Сучков Г. М. Розвиток теорії і практики створення приладів для електромагнітно-акустичного контролю металовиробів: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Харків, НТУ «ХП», 2005. — 37 с.
3. Петрищев О. Н. Теоретичні основи розрахунку та проектування ультразвукових перетворювачів електромагнітного типу: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Київ, НТУУ «КПІ», 2009. — 36 с.
4. Мужичкий В. Ф., Ремезов В. Б., Комаров В. А. К основам ЭМА толщинометрии с помощью накладных преобразователей. IV. Обратное и двойное ЭМАП в тангенциальном поляризованном поле // Дефектоскопия. — 2007. — № 2. — С. 35–52.
5. Сучков Г. М., Алексеев Е. А., Захаренко В. В. Энерго- и ресурсосберегающие приборы и технологии неразрушающего контроля // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2006. — № 4. — С. 29–34.
6. Сучков Г. М. Возможности современных ЭМА толщиномеров // Дефектоскопия. — 2004. — № 12. — С. 16–25.
7. Сучков Г. М. Современные возможности ЭМА дефектоскопии // Там же. — 2005. — № 12. — С. 24–39.
8. Сучков Г. М., Донченко А. В. Реальная чувствительность ЭМА приборов // Там же. — 2007. — № 6. — С. 43–50.
9. Повышение чувствительности ЭМА приборов / Г. М. Сучков, А. В. Донченко, А. В. Десятниченко и др. // Там же. — 2008. — № 2. — С. 15–22.
10. Портативные электромагнитно-акустические толщинометры (ЭМАТ) / Г. Я. Безлюдько, Е. В. Долбня, Н. Г. Лещенко и др. // Там же. — 2004. — № 4. — С. 28–35.
11. Применение ЭМА толщиномеров А1270 для контроля проката из алюминиевых сплавов / А. А. Самокрутов, В. Т. Бобров, В. Г. Шевалдыкин и др. // В мире неразруш. контроля. — 2002. — № 4(18). — С. 24–28.
12. Власов К. Б. Некоторые вопросы теории упругих ферромагнитных (магнитоэластических) сред // Изв. АН СССР. Серия Физическая. — 1957. — 21, № 8. — С. 1140–1148.
13. Петрищев О. Н. Метод полигармонических разложений — новый подход к решению нелинейных задач магнитоупругости // Акустика и ультразвуковая техника. — 1987. — Вып. 2. — С. 85–90.
14. Петрищев О. Н. Возбуждение волн Рэлея в металлической полосе, поляризованной постоянным магнитным полем // Акустичний вісник. — 2005. — № 1. — С. 85–95.
15. Бардзокас Д. И., Кудрявцев Б. А., Сенюк Н. А. Распространение волн в электромагнитоупругих средах. — М.: Едиториал УРСС, 2003. — 236 с.

Поступила в редакцию
17.06.2011

14-я МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ТЕХНОЛОГИИ УПРОЧНЕНИЯ, НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ И РЕМОНТА: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА»

17–20 апреля 2012

Санкт-Петербург

«Бизнес-отель «Карелия»

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет и научно-производственная фирма «ПЛАЗМАЦЕНТР» при поддержке Северо-Западного федерального округа Российской Федерации и Комитета экономического развития, промышленной политики и торговли Санкт-Петербурга приглашают сотрудников высшей школы, научных работников и аспирантов принять участие в конференции, посвященной:

• конструкционным, технологическим и эксплуатационным методам повышения долговечности надежности изделий;

• технологиям наплавки, напыления, сварки, осаждения, модификации;

• технологиям ремонта — диагностике, дефектации, мойке, очистке, восстановлению размеров, обработке покрытий, окраске, консервации.

Основные технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта будут рассмотрены на секциях:

• упрочнение и модификация поверхности

• восстановление заданной геометрии

• механическая обработка нанесенных покрытий

• диагностика, дефектация, мойка и очистка

• окраска и консервация

Тел.: +7(812) 444 93 37, +7(921) 973 46 74,

факс: +7(812) 444 93 36, e-mail: info@plasmacentre.ru



ОДИН З МЕТОДІВ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ СТАЦІОНАРНОЇ ГІДРОЕЛЕКТРОПРУЖНОСТІ ДЛЯ РЕЖИМУ ПРИЙОМУ ЗВУКОВИХ ХВИЛЬ АНТЕННИМИ РЕШІТКАМИ, ЩО УТВОРЕНІ СИСТЕМАМИ СТЕРЖНЬОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

О. В. КОРЖИК, С. А. НАЙДА, д-ра техн. наук (Нац. техн. ун-т України «КПІ»),
В. І. ДЕНИСЕНКО, канд. фіз.-мат. наук (Київ. нац. торг.-економ. ун-т)

Отримано розв'язок задачі стаціонарної гідроелектропружності для режиму прийому звукових хвиль антенними решітками на основі п'єзокерамічних стержнів з повністю електродованими торцевими гранями з використанням основних положень прикладної теорії електропружності, адекватної гіпотезам Кірхгофа–Лява, а також основних рівнянь акустики, які довшзначено умовами спряження на робочих активних поверхнях.

A solution of the problem of stationary hydroelectroelasticity was obtained for the mode of sound wave reception by arrays based on piezoceramic rods with completely electroded end faces, using the main postulates of applied theory of electroelasticity adequate to Kirchhoff-Law hypotheses, as well as the main acoustic equations, which are further defined by the conditions of mating on working active surfaces

Однією з найважливіших проблем сучасної гідроакустики є проблема комплексного підходу до проектування антенних засобів, який має враховувати особливості взаємодії основних фізичних полів під час взаємного перетворення акустичної та електричної енергії. Такий комплексний підхід передбачає постановку і розв'язок задач класу гідроелектропружності для режимів прийому та випромінювання звукових хвиль системами електропружних перетворювачів, активні елементи яких представлені в основному коливальними системами сферичного, циліндричного, пластинчатого або стержньового типу.

Сучасний стан розвитку вказаного класу задач визначається достатньо великою кількістю робіт, які стосуються в основному таких моделей представлення перетворювачів, як оболонки та пластинки. Наприклад, роботи [1–3], які присвячено розв'язку задач прийому та випромінювання звуку в стаціонарній та нестаціонарній постановці для тонких дисків, сферичних та колових циліндричних тонкостінних п'єзокерамічних оболонок відповідно.

Одним з найбільш поширених типів перетворювачів, що працюють у складі гідроакустичних антен, є стержньові [4, 5]. Вказаний перетворювач має коливальну систему у вигляді механічного стержня та традиційно використовує нижні форми коливальних [4, 6]. При цьому саме стержньовим перетворювачам приділено найменше уваги в рамках наскрізної постановки. Для них відсутній загальний аналітичний розв'язок щодо ситуацій

прийому та випромінювання звуку за узагальнених умов спряження та не розглянуто питання акустичної взаємодії елементів антени між собою. Зазначимо, що лише в роботах [7, 8] запропоновано загальні розв'язки елементарних задач електропружності для прямокутних п'єзокерамічних брусків без врахування впливу акустичного поля та досліджено особливості деяких видів електродування їх поверхонь.

В зв'язку з цим актуальним та доцільним є розгляд в наскрізній постановці роботу прийомної решітки стержньових перетворювачів як сукупності коливальних систем, що працюють в рідині в умовах зв'язаності коливальних. Вважаємо, що вказаному підходу притаманне врахування взаємозв'язків та взаємовпливу всіх полів, що беруть участь в процесі перетворення акустичної та електричної енергії.

Постановка задачі. Метою роботи є отримання аналітичного розв'язку задачі стаціонарної гідроелектропружності для оберненої акустичної антенної решітки, що складена з стержньових перетворювачів і працює в режимі прийому за традиційних умов використання фронтальних граней перетворювача та видів електродування.

Вважаємо, що призматичний стержень у вигляді прямокутного п'єзокерамічного бруска фіксованої довжини l з осью поляризації підключено до прийомного електричного тракту. Відомо [6,9], що задача описання напружено-деформованого стану вказаного електропружного елемента з врахуванням особливостей зовнішнього навантаження та його геометрії в загальному випадку достатньо складна навіть за відсутності зовнішніх механічних напруг на бічних поверхнях



стержня. Припущення та спрощення, які відповідають точним розв'язкам і є адекватними гіпотезам Кірхгофа–Лява, в основному стосуються використання гіпотези плоских перетинів для задачі про чисте стиснення–розтягнення п'єзокерамічного елемента вказаного типу [9]. При цьому вважається, що стержень виконує поздовжні гармонічні коливання, для яких зміщення та електричний потенціал є функціями лише осьової координати [7, 9]. Стержень виконано з п'єзоматеріалу, а його торцеві грані повністю електродовані.

Застосуємо до бруска довгохвильовий підхід [7, 9] та визначимо характер руху його торців як малого за хвильовим розміром поршня, що працює в ідеальній рідині.

Таким чином, рівномірність розподілення механічного збудження в межах площин торців стержня і зроблені припущення дозволять провести розв'язання наскрізної задачі про прийом звуку стержневим перетворювачем, приводячи її електромеханічну складову до задачі про поздовжні коливання п'єзокерамічного призматичного стержня з поздовжньою поляризацією при збудженні його зовнішнім акустичним впливом. Акустичну складову задачі приведено до ситуації прийому звука малими за хвильовими розмірами тілами.

Пропонується антенна решітка у вигляді системи з N електропружних елементів. Кожний з елементів решітки є багатомодовим перетворювачем з коливальною системою стержньового типу.

Розгляду підлягають поздовжні механічні коливання призматичного стержня з поляризацією вздовж осі $O_s X_s$ (рис. 1), який збуджується акустичним полем, утвореним суперпозицією падаючих та розсіяних на елементах решітки акустичних хвиль p_Σ . В свою чергу механічні коливання стержня призводять до наведення на електричних навантаженнях електродів перетворювачів Z_s змінної різниці потенціалів $ue^{-i\omega t}$ (клеми a і b).

Введемо ряд координатних систем (рис. 2):

– загальну прямокутну систему координат $OXYZ$, яку розміщено таким чином, що ось OX лежить в площині, що перпендикулярна площині

нам поперечного перетину стержнів, а осі OZ і OY — паралельні їм;

– локальні прямокутні системи координат $O_s X_s Y_s Z_s$ і $O_j X_j Y_j Z_j$, які орієнтовані в просторі так, що осі $O_s X_s$ і $O_j X_j$ співпадають з поздовжніми осями відповідних стержнів, а осі $O_s Y_s$, $O_s Z_s$ і $O_j Y_j$, $O_j Z_j$ належать відповідним діаметральним площинам $O_j Y_j Z_j$ елементів антени;

– загальну $OR\theta\phi$ та локальні $O_s r_s \theta_s \phi_s$ ($O_j r_j \theta_j \phi_j$) сферичні системи координат;

а також одиничний вектор \mathbf{n} , положення якого відповідає кутам α і β до площин OYX і OYZ відповідно та визначає напрямок падіння плоскої акустичної хвилі p^0 .

Положення центрів сусідніх сфер визначаються системами сферичних координат, векторами r_{js} і r_{sj} , а також сукупністю кутів θ_{sj} , ϕ_{sj} та θ_{js} , ϕ_{js} відповідно.

Під впливом зовнішнього збудження p^0 сформоване повне акустичне поле оцінюється в довільній точці M з координатами R , θ і ϕ відносно центру загальної системи координат $OXYZ$. Поле описується рівнянням Гельмгольца в сферичних координатах і має бути визначено з врахуванням дифракційного взаємовпливу всіх елементів системи з діаметрами d_s , що виникає внаслідок багаторазового розсіювання акустичних хвиль. Розв'язання задачі проводимо з використанням умов спряження для всебічного навантаження сферичних перетворювачів антенної решітки з боку акустичного поля та з використанням основних положень прикладної теорії електропружності, що є адекватними гіпотезам Кірхгофа–Лява. При цьому вважаємо, що для s -го перетворювача довжиною $l_s = d_s$ існують лише нормальні механічні напруги $\sigma_{x_s}^s$, що рівномірно розподілені по торцях $x_s = \pm l_s$ і задаються рівністю:

$$\sigma_{x_s}^s \Big|_{x_s = \pm l_s} = \sigma_0 = -p_\Sigma, \quad (1)$$

а решта напружень на всіх гранях стержня дорівнюють нулю [10].

Граничні умови по електричному полю у відповідності до роботи [7] для випадку навантаження перетворювачів на деякі довільні комплексні опори записуються як:

$$\int_{-l_s/2}^{l_s/2} \frac{\partial D_x^s}{\partial t} = -\frac{U^s}{Z_s}; \quad (2)$$

для ділянок поверхні п'єзоелемента, які не містять електродів, вважаємо що:

$$D_y^s \Big|_{y_s = \pm b_s} = 0, \quad D_z^s \Big|_{z_s = \pm h_s} = 0, \quad (3)$$

$D_y^s \Big|_{y_s = \pm b_s}, D_z^s \Big|_{z_s = \pm h_s}$ — складові вектора електричної індукції.

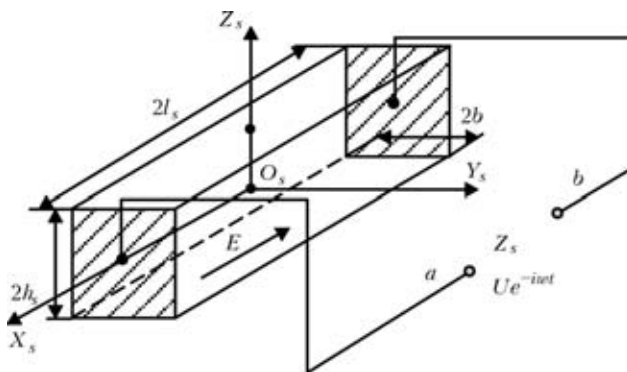


Рис. 1. Призматичний стержень з осьовою поляризацією

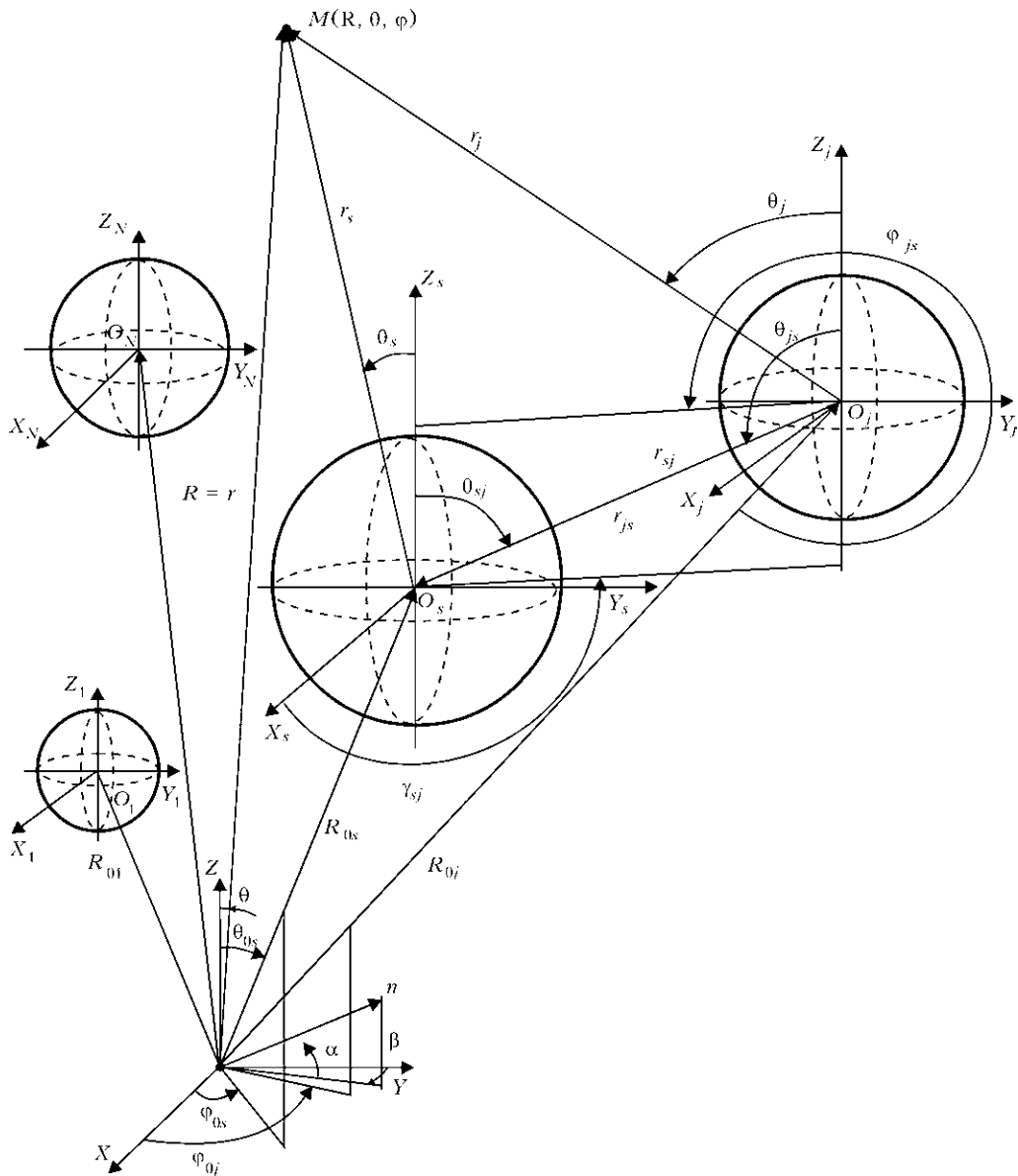


Рис. 2. Системы координат

В якості кінематичних умов обираємо умови спряження у вигляді рівності нормальних складових швидкостей часток середовища та швидкостей зміщення по нормалі точок поверхонь торців перетворювача:

$$v^s(\theta_s, \varphi_s) = v_0^s = \frac{\partial u_x^s}{\partial t} = \frac{1}{i\omega\rho} \left. \frac{\partial p_\Sigma}{\partial r_s} \right|_{r_s=l_s} \quad (4)$$

В результаті розв’язання наскрізної задачі прийому передбачається визначити знакомінні електричні напруги на навантаженнях перетворювачів Z_s по відомому тиску в полі падаючої плоскої акустичної хвилі.

Розв’язання задачі. Використовуючи вказані вище припущення, спростуємо співвідношення для п’єзоэффекту [7, 10], залишаючи лише одну пару рівнянь:

$$\epsilon_x = s_{33}^E \sigma_x + d_{33} E_x, \quad D_x = \epsilon_{33}^T E_x + d_{33} \sigma_x, \quad (5)$$

де ϵ_x — компонента тензора деформацій; s_{33}^E — пружна податливість при незмінному електричному полі; d_{33} — компоненти тензора п’єзомодуля; E_x, D_x — компоненти вектора напруженості та електричної індукції; ϵ_{33}^T — діелектрична проникливість при незмінній механічній нарузі.

Доповнюючи співвідношення (5) у відповідності до роботи [7] рівняннями руху суцільного середовища

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} = \rho_{is} \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2}, \quad (6)$$

рівняннями вимушеної електростатики

$$\frac{\partial D_x}{\partial x} = 0, \quad E_x = -\frac{\partial \Psi}{\partial x} \quad (7)$$

(Ψ — електричний потенціал) та співвідношеннями Коші для поздовжніх переміщень u_x і деформацій



$$\epsilon_x = \frac{\partial}{\partial x} U_x \quad (8)$$

отримаємо систему рівнянь, до якої застосовуються граничні умови (1)–(3). Поперечні деформації не розглядаємо.

Результуюча система рівнянь, яка записана відносно переміщень U_x та електричного потенціалу Ψ_x , має вигляд:

$$\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} = \frac{1}{c_{is}^2} \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2}, \quad \frac{\partial^2 \Psi_x}{\partial x^2} = \frac{1}{d_{33}^2 (1 - k_{33}^2)} \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2}, \quad (9)$$

де $c_{is}^2 = 1/\rho_{is} s_{33}^E (1 - k_{33}^2)$ — швидкість поздовжніх хвиль в п'єзокерамічному стержні; $k_{33}^2 = d_{33}^2/s_{33}^E \epsilon_{33}^T$ — поздовжній статичний коефіцієнт електромеханічного зв'язку (КЕМЗ).

Розв'язки системи (9):

$$u_x = u_x(x) e^{-i\omega t} = C_n \sin(\lambda x) e^{-i\omega t}, \quad \lambda = \omega/c_{is}, \quad (10)$$

$$\Psi = \Psi(x) = [B_n x + u_x(x) k_{33}^2 / (d_{33} (1 - k_{33}^2))] e^{-i\omega t}.$$

Сталі C_n і B_n визначаються з використанням граничних умов (1)–(3).

Амплитудні значення ϵ_x , D_x , σ_x та E_x у відповідності до [7] знаходимо за формулами:

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \lambda C_n \cos(\lambda x); \quad D_x = -\epsilon_{33}^T (1 - k_{33}^2) B, \\ \sigma_x &= B_n d_{33} / s_{33}^E + \epsilon_x / s_{33}^E (1 - k_{33}^2), \\ E_x &= -B_n - k_{33}^2 u_x(x) / d_{33} (1 - k_{33}^2). \end{aligned} \quad (11)$$

Враховуючи позначення повного акустичного поля як p_s , переходячи до змінної додавання та застосовуючи результати робіт [3, 10], запишемо:

$$p_M(R, \theta, \varphi) = p_\Sigma = p^0 + \sum_{s=1}^N p_s'(r_s, \theta_s, \varphi_s), \quad (12)$$

$$r_{0s} \leq r_s < \infty, \quad 0 \leq \theta_s \leq \pi, \quad 0 \leq \varphi_s \leq 2\pi.$$

Відповідно до рис. 2 $p^0 = e^{ik(\mathbf{nR})}$, $\mathbf{R} = \mathbf{R}_{0s} + \mathbf{r}_s$ розкладемо плоску хвилю за сферичними функціями:

$$p^0 = p_0(r_s, \theta_s, \varphi_s) = e^{ik(\mathbf{nR}_{0s})} \times \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n i^n \frac{j_n(kr_s)}{N_{nm}} P_n^m(\cos \theta_s) P_n^m(\cos \alpha) e^{im(\varphi - \beta)}, \quad (13)$$

де $P_n^m(\cos \theta_s)$ — приєднані функції Лежандра першого роду ступеня n та порядку m ; $J_n(kr_s)$ — сферична функція Бесселя n -го порядку.

Повне поле в координатах s -ї сфери з врахуванням виразів (12) і (13) записується у вигляді:

$$p_s(r_s, \theta_s, \varphi_s) = e^{ik(\mathbf{nR}_{0s})} 2 \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n i^n \frac{j_n(kr_s)}{N_{nm}} \times P_n^m(\cos \theta_s) P_n^m(\cos \alpha) e^{im(\varphi - \beta)} + \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n A_{nm}^s P_n^{(m)}(\cos \theta_s) h_n^{(1)}(kr_s) e^{im\varphi_s}. \quad (14)$$

в цьому рівнянні A_{nm}^s — невідомі коефіцієнти; $h_n^{(1)}$ — сферична функція Ханкеля 1-го роду, для хвиль, що розходяться.

Далі, відокремлюючи сферу з номером j , вважаючи, щоб на її поверхні виконувались умови

$$v^j(\theta_j, \varphi_j) \Big|_{r_j=l_j} = \frac{1}{i\omega\rho} \frac{\partial p_\Sigma}{\partial r_j} \Big|_{r_j=l_j} \quad (15)$$

і застосовуючи теорему додавання для сферичних хвильових функцій

$$P_q^{(p)}(\cos \theta_s) h_q^{(1)}(kr_s) e^{ip\varphi_s} = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n Q_{nmpq}^{(1)}(r_{sj}, \theta_{sj}, \varphi_{sj}) P_n^{(m)}(\cos \theta_j) j_n^{(1)}(kr_j) e^{im\varphi_j}, \quad (16)$$

$$\text{де } Q_{nmpq}^{(1)}(r_{sj}, \theta_{sj}, \varphi_{sj}) = \frac{2i^{n-q}}{N_{nm}} \sum_{\sigma=|n-q|}^{n+q} i^\sigma b_\sigma^{qpnm} P_n^{(n-m)} \times (\cos \theta_{sj}) j_n^{(1)}(kr_{sj}) e^{i(p-m)\varphi_{sj}}; \quad N_{nm} = \frac{2}{2n+1} \frac{(n+m)!}{(n-m)!}$$

p, m — азимутальні числа, σ, q — змінні додавання, переходимо до повного поля тиску в точці $M(R, \theta, \varphi)$:

$$p_M(R, \theta, \varphi) = e^{ik(\mathbf{nR}_{0s})} 2 \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n i^n \frac{j_n(kr_s)}{N_{nm}} \times P_n^m(\cos \theta_s) P_n^m(\cos \alpha) e^{im(\varphi - \beta)} + \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \tilde{A}_{nm}^j P_n^{(m)} \times (\cos \theta_j) h_n^{(1)}(kr_j) e^{im\varphi_j} + \sum_{s=1}^N \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \tilde{A}_{nm}^s P_n^{(m)} \times (\cos \theta_s) h_n^{(1)}(kr_s) e^{im\varphi_s} \frac{2i^{n-q}}{N_{nm}} \times \sum_{\sigma=|n-m|}^{n+q} i^\sigma b_\sigma^{qpnm} P_\sigma^{(p-m)} \times (\cos \theta_{sj}) j_\sigma^{(1)}(kr_{sj}) e^{i(p-m)\varphi_{sj}}. \quad (17)$$

Приводячи решітку до прямолінійної та виконуючі пов'язані з цим спрощення, одержуємо вираз:



$$\begin{aligned}
 p_M(r) &= p_\Sigma = e^{ik(nR_{0s})} \times j_0(kr_j) + \tilde{A}_0^j(kr_j) + \\
 &+ \sum_{\substack{s=1 \\ s \neq j}}^N \tilde{A}_0^s j_0^{(1)}(kr_j) h_0^{(1)}(kr_{sj}) = \\
 &= e^{ikd(s-1)\cos\beta} \times j_0(kr_j) + \tilde{A}_0^j h_0^{(1)}(kr_j) + \\
 &+ \sum_{\substack{s=1 \\ s \neq j}}^N \tilde{A}_0^s j_0^{(1)}(kr_j) h_0^{(1)}(kr_{sj}).
 \end{aligned} \quad (18)$$

Тоді умови спряження (4), (7) приводимо до виразу:

$$\begin{aligned}
 v^j(\theta_j, \varphi_s) \Big|_{r_j=l_j} &= \frac{1}{i\omega\rho} \frac{\partial p_\Sigma}{\partial r_j} \Big|_{r_j=l_j} = \frac{1}{i\rho c} \left[e^{ikd(s-1)\cos\beta} \times \right. \\
 &\times j_0'(kl_j) + \tilde{A}_0^j h_0'^{(1)}(kl_j) h_0^{(1)}(kr_{sj}) \Big].
 \end{aligned} \quad (19)$$

Застосовуючи умови гармонійності, розв'язки (10), (11), рівняння для акустичного поля (18), граничні умови (1)–(3), а також умови спряження (19) після ряду перетворень зведемо задачу до системи лінійних алгебраїчних рівнянь, які записані відносно невідомих коефіцієнтів \tilde{A}_0^j та \tilde{A}_0^s :

$$\tilde{A}_0^j + \sum_{\substack{n=1 \\ s \neq j}}^N \tilde{A}_0^s \tilde{Z}_0^{sj} = \tilde{D}^j, \quad (20)$$

де

$$\tilde{D}^j = -e^{ikd(s-1)\cos\beta} \frac{j_0(kl_j) - j_0'(kl_j)/b_0(\omega)}{h_0(kl_j) - h_0'^{(1)}(kl_j)/b_0(\omega)}, \quad (21)$$

$$\tilde{Z}_0^{sj} = \frac{j_0(kl_j) - j_0'(kl_j)/b_0(\omega)}{h_0^{(1)}(kl_j) - h_0'^{(1)}(kl_j)/b_0(\omega)} h_0^{(1)}(kl_{sj});$$

$$b_0(\omega) = b_3(\omega)/b_7(\omega), \quad b_1(\omega) = i\omega \epsilon_{33}^E 2l_s (1 - k_{33}^2);$$

$$b_3(\omega) = \omega\rho c \sin\lambda_s / (\omega\rho c \lambda \cos\lambda_s) (b_1(\omega) - 2l_s/Z_s);$$

$$\begin{aligned}
 b_2(\omega) &= [b_1(\omega) - 2l_s/Z_s] / [s_{33}^E (1 - k_{33}^2) b_1(\omega)] + \\
 &+ d_{33} 2l_s / s_{33}^E Z_s b_1(\omega).
 \end{aligned}$$

Кількість рівнянь системи (20) визначається кількістю перетворювачів решітки, а сама система розв'язується відомими чисельними методами. Отже, вважаючи амплітуду тиску в падаючій хвилі p^0 одиничною, виконуючи необхідні асимптотичні наближення, що пов'язані з малістю аргументу сферичних функцій та застосовуючи вирази для коефіцієнтів (21), за системою (20) знаходимо коефіцієнти \tilde{A}_0^j та \tilde{A}_0^s . Після цього можливо визначити величину електричної напруги $U^{s,j}$ на опорах $Z_{s,j}$ за виразом:

$$\begin{aligned}
 E_x^{s,j} &= \left[e^{ikd(s-1)\cos\beta} \times j_0(kl_j) + \tilde{A}_0^j h_0^{(1)}(kl_j) + \right. \\
 &+ \left. \sum_{\substack{s=1 \\ s \neq j}}^N \tilde{A}_0^s j_0^{(1)}(kl_j) h_0^{(1)}(kr_{sj}) \right] / b_2(\omega),
 \end{aligned}$$

а також характеристики механічного і акустичного поля.

Висновки

Проведено постановку та розв'язання задачі про прийом звукових хвиль антенною решіткою стержньових електропружних перетворювачів.

При цьому запропонована можливість представлення прийомного стержньового перетворювача у вигляді прямокутного поляризованого п'єзокерамічного бруска малих хвильових розмірів, з електродами на торцевих гранях; застосовано припущення класичної теорії пружності і акустики в частині малості хвильових розмірів перетворювачів решітки при описанні характеру коливань одиночного перетворювача.

В межах зазначених підходів, припущень та гіпотез, адекватних гіпотезам Кірхгофа–Лява, для стержнів отримано аналітичний розв'язок наскрізної задачі прийому та показано, що:

– розв'язання вказаної задачі може бути зведено до розв'язання лінійної системи алгебраїчних рівнянь відносно невідомих коефіцієнтів;

– кількість рівнянь системи визначається кількістю перетворювачів решітки;

– характеристики фізичних полів перетворювачів запропонованої антенної решітки можуть бути досліджені з використанням отриманих розв'язків для акустичних, механічних та електричних полів.

В подальшому із врахуванням отриманих аналітичних співвідношень є доцільним проведення розрахунків просторово-енергетичних характеристик вказаних вище полів для типових схем побудови стержньових перетворювачів та антенних решіток на їх основі.

Решена задача стационарной гидроэлектроупругости о приеме звуковых волн антенными решетками на основе пьезокерамических стержней с полностью электродированными торцевыми гранями с использованием основных положений прикладной теории электроупругости, адекватной гипотезам Кирхгофа–Лява, а также основных уравнений акустики, доопределенных условиями сопряжения на рабочих активных поверхностях.

1. Гринченко В. Т., Карлаш В. Л., Мелешко В. В. Исследование планарных колебаний прямоугольных пьезокерамических пластин // Прикл. механика. — 1976. — 12, № 5. — С. 71–78.
2. Савин В. Г., Моргунов И. О. Преобразование акустических импульсов в электрические сферической пьезокерами-



- ческой оболочкой // Электроника и связь. — 2006. — № 6. — С. 36–42.
3. Коржик О. В., Лейко О. Г. Взаємодія плоскої акустичної хвилі з лінійною решіткою електропружних циліндричних перетворювачів // Наук. вісті НТУУ «КПІ». — 2001. — № 4. — С. 106–114.
 4. Подводные электроакустические преобразователи. Расчет и проектирование. Справочник / Под ред. В. В. Богородского. — Л.: Судостроение, 1983. — 248 с.
 5. Дідковський В. С., Лейко О. Г., Савін В. Г. Электроакустичні п'єзокерамічні перетворювачі (розрахунок, проектування, конструювання). — Кіровоград: «Імекс-ЛТД», 2006. — 448 с.
 6. Аронов Б. С. Электромеханические преобразователи из пьезоэлектрической керамики. — Л.: Энергоатомиздат, 1990. — 271 с.
 7. Гринченко В. Т., Улитко А. Ф., Шульга Н. А. Механика связанных полей в элементах конструкции: В 5 т. — Киев: Наук. думка, 1989. — Т.5. Электроупругость. — 280 с.
 8. Експериментальне вивчення ефективності перетворення енергії на резонансних коливаннях п'єзокерамічного стержня з розрізними електродами при керованому електричному збудженні / В. О. Андрущенко, О. В. Борисейко, Д. С. Немченко, І. А. Улитко // Доп. акустичного симпозиуму КОНСОНАНС-2009. — Київ, Електронний ресурс// <http://www.hydromech.kiev.ua/rus/WWW-CONS/2009/cons2009-038-043.pdf>.
 9. Тимошенко С. П. Колебания в инженерном деле. — М.: Наука, 1967. — 444 с.
 10. Коржик А. В. Один из методов решения задачи стационарной гидроупругости для режима излучения звуковых волн антенными решетками, образованными системами стержневых преобразователей // Інформаційні системи, механіка та керування. — 2010. — Вып. 5. — С. 61–74.

Надійшла до редакції
15.08.2011

ШЕСТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах»

Украина, Крым, Большая Ялта,
Дом творчества ученых «Кацивели» НАНУ, 29 мая – 01 июня 2012 г.



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

Тематика конференции

Математическое моделирование:

- физических явлений, определяющих эффективность и распределение тепловыделений при сварочном нагреве;
- процесса переноса металла при сварке;
- образования и гидродинамики сварочной ванны при сварке плавлением сплошных и пористых материалов;
- кристаллизации сварочной ванны, химического состава зоны проплавления и образования химической неоднородности;
- кинетики микроструктурных изменений при одно- и многопроходной сварке;
- зависимости химический состав — микроструктура — механические свойства;
- кинетики деформационных процессов в температурных интервалах образования горячих трещин и условий их предупреждения;

- Рабочие языки конференции — украинский, русский, английский.
- Для участия в конференции необходимо заполнить регистрационную карточку и направить ее в Оргкомитет до 15 марта 2012 г. К началу конференции будут изданы тезисы докладов.
- Требования к оформлению тезисов. Текст следует набирать на одном из рабочих языков в редакторе WORD (кельг 12, через 1,5 интервала). Объем тезисов — 1 страница.

- термдеформационных процессов при сварке давлением с учетом больших деформаций;
- транспорта водорода в сварных соединениях;
- оценки риска образования холодных (водородных) трещин;
- остаточных напряжений и деформаций при многопроходной сварке с учетом изменений микроструктуры металла;
- деградации свойств материала сварных соединений под воздействием высоких температур, химически агрессивных сред и ядерного облучения;
- процесса идентификации дефектов в сварных соединениях при неразрушающих методах испытаний.

Информационные технологии в сварке, наплавке и нанесении покрытий.

Основные даты

Подача заявок на участие и тезисов докладов до 15.03.2012 г. Рассылка второго информационного сообщения до 30.03.2012 г. Рассылка приглашений на конференцию и подтверждение участия до 20.04.2012 г. Оплата организационного взноса производится на основании счетов Оргкомитета или непосредственно во время проведения конференции.

Оргкомитет

Украина, 03680, г. Киев, ул. Боженко, 11
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины
Тел./факс: (38044) 200-82-74
E-mail: journal@paton.kiev.ua, romanova@paton.kiev.ua
www.paton.kiev.ua



ЗАСТОСУВАННЯ НЕЙРОМЕРЕЖЕВИХ ТЕХНОЛОГІЙ У СИСТЕМАХ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

В. С. ЄРЕМЕНКО, канд. техн. наук, **А. В. ПЕРЕЇДЕНКО**, инж., **О. В. МОНЧЕНКО**, канд. техн. наук (Нац. авіац. ун-т)

Приведено результати використання нейронних мереж для вирішення задач неруйнівного контролю виробів з композиційних матеріалів. Описано структуру, алгоритми навчання та роботи нейронної мережі Кохонена, багатопараметрового перцептронну, гібридної нейронної мережі, а також мереж адаптивної резонансної теорії.

Use of neural networks for nondestructive testing of composite materials was introduced and investigated. Structures and principles of operation of Kohonen neural network, multilayer perceptron, hybrid neural network and neural networks of adaptive resonance theory are described.

Вироби з композиційних матеріалів, що використовуються в сучасному авіабудуванні, можуть мати різноманітні дефекти, які важко піддаються діагностиці, особливо на початкових стадіях їх розвитку. На процес діагностики композиційних матеріалів великий вплив мають випадкові чинники, що обумовлені змінами властивостей композитів, які виникають внаслідок складності процесів виготовлення, великої кількості типів можливих дефектів, що не піддаються формалізованому опису, недосконалості методик контролю та дефектоскопічного обладнання та ін. Проблемою при контролі виробів з композиційних матеріалів є складність виготовлення еталонних зразків об'єктів.

За таких умов достовірність діагностики композиційних матеріалів визначається не лише використаними фізичними методами отримання інформації про технічний стан виробу, але і математичними моделями, покладеними в основу методів діагностики, методиками обробки одержуваної інформації з метою формування просторів параметрів і прийняття діагностичних рішень.

В сучасних приладах і системах НК композиційних матеріалів використані, в основному, детерміновані моделі і відповідні їм методи обробки інформативних сигналів і прийняття діагностичних рішень, які не забезпечують необхідну завадостійкість, точність вимірювань і достовірність діагностики. Однак отримані під час контролю інформаційні сигнали несуть набагато більше інформації про стан об'єкту контролю (ОК), ніж використовується сучасними методами контролю для прийняття рішення про наявність або відсутність дефекту та його класифікації.

Одним з можливих напрямів підвищення ефективності систем НК виробів авіаційного призначення з композиційних матеріалів є аналіз множини інформативних параметрів сигналів, тобто проведення багатопараметрового контролю. Але статистичні критерії, що використовуються на да-

ний час при багатопараметровому контролі, призводять до формування надмірних і складних вирішальних правил. Якщо для побудови класифікаційного правила використовуються гіперплощини, то у випадку багатомірних лінійно неподільних просторів розподілу діагностичних ознак такі розділяючі гіперплощини будуються шляхом вирішення системи нелінійних рівнянь, що є занадто складним (з обчислювальної точки зору) і знижує ефективність роботи інформаційно-вимірювальної системи або в деяких випадках взагалі неможливим.

Альтернативним шляхом обробки експериментальних даних та побудови правил прийняття рішень при багатопараметровому контролі виробів з композиційних матеріалів є застосування штучних нейронних мереж (НМ). Існує багато наукових праць, що описують та підтверджують ефективність застосування нейронних мереж для первинної обробки інформаційних сигналів в НК: виділення сигналів на фоні завад або розділення сигналів тощо [1–3]. Проте це не єдиний напрямок їх можливого застосування в задачах НК: навчена нейронна мережа не тільки вміє розпізнавати (класифікувати) отримані під час контролю сигнали з датчиків, але і зберігає важливу інформацію про закономірності та взаємозв'язок форми сигналу і стану ОК. Це дозволяє нейронній мережі правильно класифікувати нові сигнали та можливі дефекти, що не були їй відомі раніше і не зустрічались під час навчання, дозволяє динамічно розширювати власну базу знань. Тому одним із напрямків застосування нейронних мереж є їх використання при багатопараметровому контролі для прийняття рішення про придатність виробу або класифікацію його дефектів, інтерпретацію експериментальних даних та формування вирішального правила діагностики.

Нейронні мережі являють собою нелінійні системи, що дозволяють в багатьох випадках набагато краще класифікувати дані, ніж математичні



та статистичні методи, що застосовуються на даний час. Відмінна особливість нейронних мереж полягає в тому, що вони не програмуються — не використовують ніяких правил виводу для прийняття рішення діагностики, а навчаються робити це на прикладах. Нейронні мережі дають можливість будувати складні розділяючі гіперплощини, проводити класифікацію лінійно нероздільних об'єктів, а також вивчати нову інформацію та доповнювати власну базу знань про номенклатуру можливих класів без втрати раніше вивченої інформації.

Застосування нейронних мереж в задачах НК виробів із композиційних матеріалів описано дуже мало, зокрема це роботи [3, 4], і тому задача розробки нейромережевого класифікатора для інформаційно-виміральної системи діагностики виробів з композитів є актуальною.

Для вирішення задач НК (проведення кластерного аналізу, визначення стану ОК, класифікація його дефектів, прогнозування розвитку дефекту під час експлуатації, розпізнавання образів дефектів тощо) було проведено дослідження таких архітектур нейронних мереж, як нейронна мережа Кохонена, багат шаровий персептрон (БШП), мережа радіальнобазисних функцій, гібридна нейронна мережа, мережі адаптивної резонансної теорії. Перелічені архітектури нейронних мереж відрізняються за алгоритмами роботи та їх навчання, що визначає коло задач, для яких вони використовуються.

В даній статті представлено та описано алгоритми роботи і навчання, переваги та недоліки, а також задачі, які можуть бути вирішені кожною із вказаних нейронних мереж.

Нейронна мережа Кохонена [5–7] призначена для вирішення задач кластерного аналізу та об'єднання множин діагностичних ознак у групи, формування класів дефектів ОК, визначення його стану тощо. Мережа складається з деякої кількості M адаптивних лінійних суматорів, що діють паралельно (лінійних формальних нейронів). Всі вони мають однакову кількість входів N і отримують на свої входи один і той же вектор вхідних сигналів $x = (x_1, \dots, x_N)$. Дані, що подаються на входи нейронної мережі Кохонена представляються у вигляді вектора діагностичних ознак в N -вимірному евклідовому просторі, а також мають бути правильно промасштабовані для подальшої їх обробки. В процесі функціонування нейрони мережі Кохонена визначають функцію відстані $\rho_k(X, W_k)$ [6] між вхідним вектором та власними центрами, де X — вхідний вектор, W_k — вагові коефіцієнти нейрона k . На підставі отриманого значення функції відстані мережею приймається рішення про належність даного вхідного вектору до певної групи (кластеру). Результатом роботи нейронної мережі Кохонена є побудова відображення набору

вхідних векторів високої розмірності на карту кластерів меншої розмірності, причому таким чином, що близьким кластерам на карті відповідають близькі один до одного вхідні вектори в початковому просторі. Таким чином, в результаті функціонування (самоорганізації) на виході мережі Кохонена формуються кластери (група активних нейронів певної розмірності), що характеризують певні категорії вхідних векторів, що відповідають однаковій вхідній ситуації (наприклад, певному класу можливих дефектів об'єкту контролю).

Навчання такої мережі відбувається за алгоритмом навчання без учителя одним із наступних правил конкуруючого навчання [7]: WTA (winner takes all), CWTA (conscience WTA), WTM (winner takes most) тощо. Алгоритм роботи та формування класів дефектів ОК за допомогою мережі Кохонена можна представити наступним чином:

- 1) ініціалізувати вагові коефіцієнти випадковими значеннями. Задати величину швидкості ϵ та часу навчання t_{max} ;
- 2) подати значення вхідних сигналів $X = (x_1, \dots, x_p)$ на вхід мережі;
- 3) визначити відстань ρ_k від вхідного сигналу X до кожного нейрона k мережі;
- 4) знайти нейрон-переможець, тобто знайти нейрон k , для якого відстань ρ_k є найменшою;
- 5) адаптувати вагові коефіцієнти нейрона-переможця;
- 6) оновити величину швидкості навчання $\epsilon(t)$, якщо цього передбачає алгоритм навчання;
- 7) якщо $(t < t_{max})$, то перейти до пункту 2, якщо інше — СТОП.

Оскільки для настройки параметрів нейронної мережі Кохонена використовується алгоритм навчання без учителя, то за рахунок цього мережу можна використовувати для вирішення задач безеталонної діагностики, тому що вона не потребує початкової інформації про ОК. Однак у випадку складних лінійно-нероздільних просторів даних достовірність формування класів нейронною мережею Кохонена не перевищує показника 0,88...0,93 [6, 8].

Іншим поширеним класом нейронних мереж, що може бути використана у НК, є багат шаровий персептрон (БШП). Даний тип нейронної мережі вирішує такі задачі, як визначення стану ОК, класифікація можливих дефектів, прогнозування розвитку дефекту з часом, розпізнавання образів дефектів, інтерполяція даних (визначення характеру залежності між вхідними даними та станом ОК).

Багат шаровий персептрон являє собою мережу з L шарами нейронів та J_l нейронами на кожному шарі, l — номер шару ($l \in 1 \dots L$) та n входами нейронів першого шару. Нейрони кожного шару з'єднуються з нейронами попереднього і подаль-



шого шарів за принципом «кожен з кожним». Кожен шар виконує нелінійне перетворення від лінійної комбінації вихідних сигналів попереднього шару. Таким чином, БШП формує на виході довільну багатовимірну функцію при відповідному виборі кількості шарів, діапазону зміни сигналів і параметрів нейронів. За рахунок почергового розрахунку лінійних комбінацій і нелінійних перетворень досягається апроксимація довільної багатовимірної функції при відповідному виборі параметрів мережі. Вихідні сигнали першого шару нейронів обмежують у попередньому наближенні ділянку розпізнавальних сигналів і потрапляють на другий шар мережі. Нейрони другого шару додають ще одну площину, що розділяє інформаційний простір. Нормаль даної площини є лінійною комбінацією нормалей першого шару нейронів. Таким чином, кожен нейрон другого шару виділяє фрагмент інформаційного простору. Далі сигнали потрапляють на третій шар, де виконується ще більш детальне розділення простору діагностичних ознак. За такою схемою послідовно виконується фрагментація інформаційного простору. Вихідний нейрон здійснює об'єднання виділених на попередніх етапах фрагментів простору. Нейронна мережа в результаті утворює множини площин, що розділяє інформаційний простір і здатна виокремлювати ділянки простору зі складною конфігурацією, що залежить від взаємного розташування розділяючих площин та від послідовності накладення обмежень. Представлена мережа виконує нелінійне розділення та класифікацію об'єктів за набором діагностичних ознак, що дуже часто мають великі розмірності. Класифікатор на основі БШП є універсальним засобом апроксимації функцій, що дозволяє використовувати її для вирішення задач класифікації різного ступеня складності.

На відміну від мережі Кохонена, БШП навчається з учителем, тобто їй потрібна навчальна вибірка, що містить набір можливих вхідних сигналів (векторів даних) та відповідних їм вихідних сигналів мережі. Через це її не можна застосовувати для безеталонної діагностики ОК. Але БШП має показники достовірності класифікації [9], що значно перевищують показники мережі Кохонена, дозволяє класифікувати об'єкти навіть у випадку лінійно-нероздільних класів, а також дозволяє працювати з векторами діагностичних ознак великої розмірності і класифікувати сигнали на фоні завад.

Для навчання БШП використовуються градієнтні [7] методи, що враховують помилку нейронів кожного шару та виконують корекцію вагових коефіцієнтів нейронів в залежності від їхньої помилки. В процесі навчання мережа змінює свої параметри і вчиться давати потрібне відображення множини вхідних векторів X у множини потрібних значень виходів мережі Y . За ра-

хунок здібності до узагальнення мережею можуть бути отримані правильні результати, якщо подати на вхід вектор, який не зустрічався при навчанні. При вирішенні більшості задач для навчання БШП використовується метод зворотнього розповсюдження помилки (back propagation error) [7], згідно з яким наступний крок направлений в сторону антиградієнта функції помилки. Відповідно до цього методу функція помилки E представляється у вигляді складної функції і послідовно розраховуються частинні похідні за формулою для складної функції.

Недоліком БШП є той факт, що він не може динамічно розширювати власну базу знань і адаптуватися до появи об'єктів, які відносяться до невідомих раніше класів. Таким чином, при появі сигналу, що характеризує невідомий мережі клас, даний сигнал буде віднесено не до нового класу, а до одного з наявних класів у пам'яті мережі (які були сформовані при її навчанні), тобто виникає помилка класифікації.

Проведені дослідження [6,8,9] показали, що окремо нейронні мережі Кохонена та БШП не можуть бути використані при діагностиці виробів з композиційних матеріалів, оскільки для БШП обов'язково необхідна початкова навчальна вибірка (ап'іорна інформація про ОК та можливу номенклатуру його дефектів, що є досить складним у випадку композиційних матеріалів), а мережа Кохонена не здатна виконати достовірну класифікацію дефектів у випадку існування лінійно-нероздільних просторів діагностичних ознак.

Саме в таких випадках може використовуватись спеціально побудована гібридна нейронна мережа, що складається з шару Кохонена та БШП або радіально-базисної мережі. Подібна архітектура гібридної нейронної мережі дозволяє визначати та класифікувати дефекти виробів з композиційних матеріалів з високою достовірністю, будувати нелінійні розділяючі гіперплощини, проводити кластерний аналіз та навчатися без учителя [8].

Алгоритм роботи (рис. 1) такої мережі полягає в наступному. Шар нейронів Кохонена групує близькі вхідні сигнали X , а необхідна функція відображення множини вхідних векторів X у множини потрібних значень виходів мережі $Y = F(X)$ будується на основі звичайної нейронної мережі прямого розповсюдження (БШП або радіально-базисної мережі), що приєднана до виходів нейронів Кохонена. Нейрони шару Кохонена навчаються без учителя, на основі самоорганізації, а нейрони шарів, що використовуються для розпізнавання та класифікації, навчаються з учителем ітераційними методами. Навчальна вибірка для мережі прямого розповсюдження формується шаром Кохонена.

Таким чином, у складі розробленої гібридної нейронної мережі обидві її складові (шар Кохо-

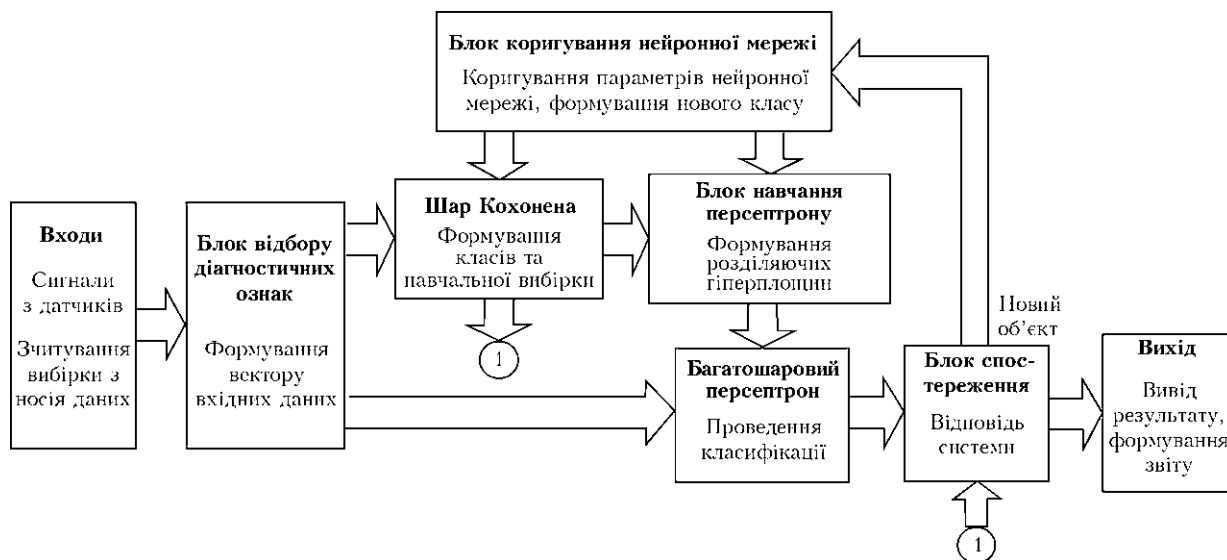


Рис. 1. Алгоритм роботи гібридної нейронної мережі

нена та БШП) функціонують як дві незалежні нейронні мережі. Мережа Кохонена використовується для вирішення задачі кластерного аналізу (попереднього розбиття множини об'єктів на класи) та формування навчальної вибірки для подальшого навчання БШП або інших мереж прямого розповсюдження і надає інформацію для виявлення нового об'єкту. БШП, що входить до складу розробленої гібридної нейронної мережі, навчається на основі створеної мережею Кохонена навчальної вибірки, використовується для вирішення задачі класифікації, дозволяє будувати складні нелінійні розділяючі гіперплощини і формує відповідь мережі щодо результату класифікації. На рис. 2 показано розподіл діагностичних ознак від дефектних і бездефектної ділянок досліджуваного зразка стільникової панелі із стільниковим заповнювачем типа ІСП-1 і обшивкою на основі склотканини Т42/1-76 [10], де 1 — виділена область діагностичних ознак, що характерні для конкретного класу; 2 — область діагностичних ознак, що не відносяться для даного класу (характерні для інших класів). Із рисунка видно, що розроблена гібридна нейронна мережа здатна апроксимувати функцію розподілу діагностичних ознак, які характерні для кожного класу, може проводити нелінійну класифікацію і виділяти області зі складною структурою (нелінійними границями).

Така гібридна мережа має всі переваги її складових (мережі Кохонена та БШП), а саме можливість виконувати кластерний аналіз даних, високу достовірність контролю, здатність будувати складні нелінійні розділяючі гіперплощини, а також визначати нові об'єкти та розширювати власну базу знань (базу запам'ятованих класів). Однак для даної мережі характерні певні недоліки: необхідно більше часу для навчання, а також додатковий час на перенавчання (відбувається у ви-

падку формування нового класу під час контролю), у випадку появи нового об'єкту (класу) відбувається повне її перенавчання, тобто втрата раніше вивченої інформації. Також для роботи даної нейронної мережі необхідним є первинний відбір діагностичних ознак (амплітуда імпульсу, його тривалість, частота, фаза, спектральна щільність тощо), за якими відбувається контроль та формування діагностичного рішення.

В процесі вирішення задачі діагностики виробів з композиційних матеріалів виникає дилема: яким чином зробити так, щоб пам'ять нейронної мережі залишалась пластичною, здатною до сприйняття нових даних, і в той же час зберігала стабільність, яка гарантує, що інформація про вже відомі класи не знищиться і не зруйнується в процесі функціонування.

Дану задачу можна вирішити із застосуванням нейронних мереж адаптивної резонансної теорії (АРТ). Мережі й алгоритми АРТ [11, 12] зберігають пластичність, необхідну для вивчення нових класів об'єктів, у той же час запобігаючи зміні раніше запам'ятованих класів. Також мережі АРТ дозволяють виконувати аналіз форми отриманих інформаційних сигналів, тобто без попередньої обробки вхідних даних та формування набору діагностичних ознак, що значно розширює область їх застосування. АРТ-мережі можуть використовуватись для вирішення таких задач НК, як кластерний аналіз, класифікація дефектів ОК, розпізнавання образів тощо.

Теорія мереж АРТ включає декілька парадигм, кожна з яких визначається формою вхідних даних і способом їхньої обробки. АРТ-1 розроблена для обробки бінарних вхідних векторів, а мережі АРТ-2 і Fuzzy-ART можуть класифікувати як бінарні, так і неперервні вектори даних.

Мережі АРТ являють собою векторний класифікатор. Вхідний вектор класифікується в за-

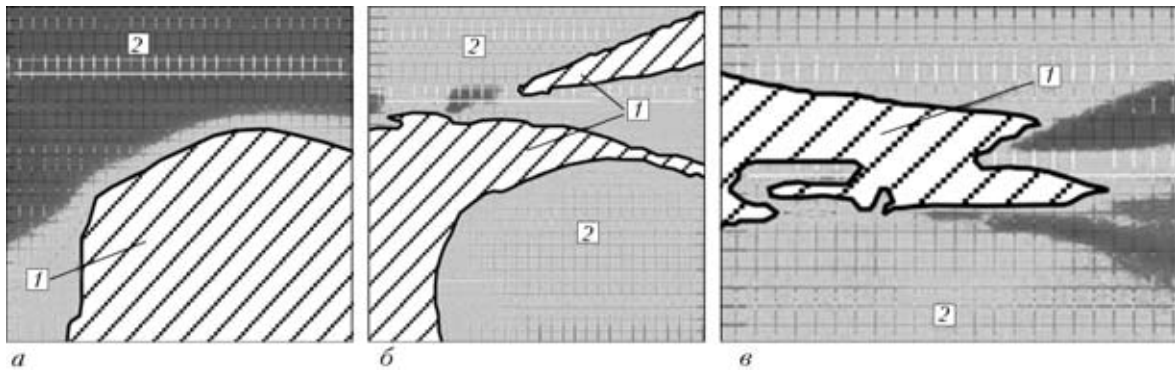


Рис. 2. Розподіл діагностичних ознак, характерних для бездефектної ділянки (а) і ділянок з різними пошкодженнями (б, в)

лежності від того, на який із раніше запам'ятованих мережею еталонних образів він схожий. Рішення щодо класифікації вхідного вектору мережа АРТ виражає у формі збудження одного з нейронів шару розпізнавання. Якщо вхідний вектор не відповідає жодному із запам'ятованих образів, створюється нова категорія (виділяється новий нейрон та запам'ятовується новий вектор), яка відповідає вхідному вектору. Якщо визначено, що вхідний вектор схожий на один з раніше запам'ятованих векторів за визначеним критерієм подібності, еталонний вектор в пам'яті нейронної мережі буде змінюватися (навчатися) під впливом нового вхідного вектора таким чином, щоб стати більш схожим на даний вхідний вектор.

Запам'ятований еталонний образ не буде змінюватись, якщо поточний вхідний вектор не виявиться схожим на нього. У такий спосіб вирішується дилема стабільності-пластичності. Новий образ може створювати додаткові класифікаційні категорії, однак новий вхідний образ не може змусити змінитися або затерти існуючу пам'ять. Алгоритм, за яким працюють розроблені АРТ-мережі зображено на рис. 3.

Нейронні мережі АРТ-2 і Fuzzy-ART мають такі переваги над описаними раніше гібридною нейронною мережею, БШП та мережею Кохонена: можливість працювати з інформаційними сигналами без попередньої обробки (відбір та форму-

вання простору діагностичних ознак), в якості інформаційного параметру може використовуватись форма сигналу, стабільність запам'ятованої інформації та можливість динамічно розширювати власну базу знань, висока роздільна здатність при класифікації даних, добра заводо захищеність, інваріантність відносно порядку пред'явлення вхідних векторів, існує можливість змінювати швидкість навчання мережі, при повторному пред'явленні навчальної вибірки нейронна мережа здатна сама виправити помилки, які були допущені на попередньому етапі роботи, можливість працювати з аналоговими сигналами. Також існує можливість навчати АРТ-мережу в процесі контролю, отже відпадає необхідність у формуванні великої кількості еталонних зразків для первинного налаштування мережі, що дозволяє використовувати її для вирішення широкого кола задач.

Характерними відмінностями нейронної мережі Fuzzy-ART від АРТ-2 є наявність в ній лише однієї матриці вагових коефіцієнтів замість двох як у АРТ-2 та використання нечітких логічних операцій. Таким чином, реалізація нейронної мережі Fuzzy-ART на персональному комп'ютері займає менше пам'яті ніж АРТ-2, але АРТ-2 має кращі показники достовірності розпізнавання вхідних векторів даних.

Для проведення НК виробів авіаційного призначення з композиційних матеріалів із застосуван-

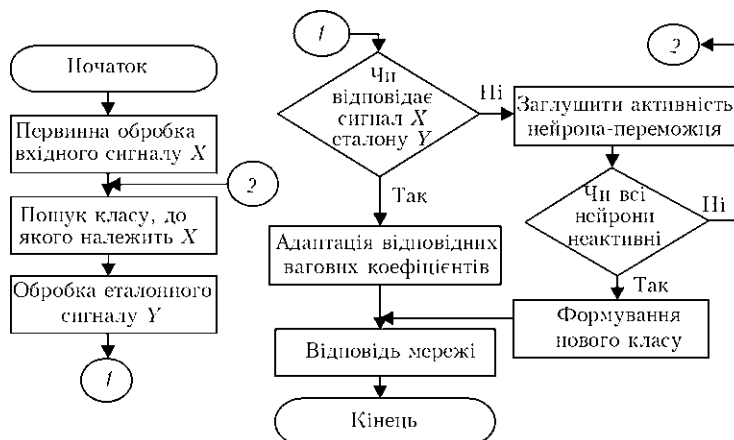


Рис. 3. Алгоритм роботи АРТ-мережі

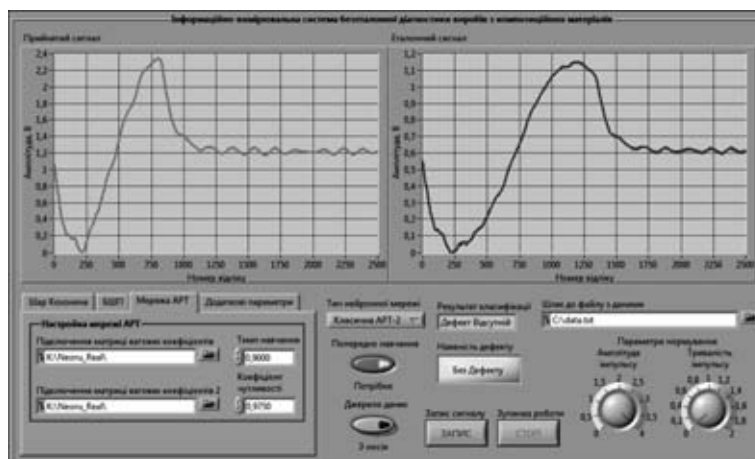


Рис. 4. Интерфейс программного обеспечения для работы с нейронными сетями АРТ

ням розроблених гібридної нейронної мережі та мереж АРТ-2 і Fuzzy-ART було розроблено спеціальне програмне забезпечення (рис. 4), що дозволяє візуалізувати вхідний та еталонний сигнали, відображає множину сформованих класів та відповідь мережі щодо результату контролю. Вибір необхідної архітектури мережі відбувається за допомогою перемикача, на якому потрібно вибрати відповідну архітектуру НМ (гібридна НМ, АРТ-2 або Fuzzy-ART).

Порівняльний аналіз описаних архітектур нейронних мереж проводився на основі досліджень [6, 8, 9, 11, 12] із використанням експериментальних даних, отриманих при проведенні контролю зразків стільникових панелей методом низькошвидкісного удару [10]. Необхідно зазначити, що розроблене програмне забезпечення для роботи з нейронними мережами дозволяє працювати і з іншими методами діагностики: імпедансним (в якості інформаційних ознак використовуються амплітуда сигналу, частота, фаза), вихрострумовим (амплітуда, фаза), ультразвуковим (форма обвідної луна-сигналу) тощо. Дослідний зразок композитної панелі із стільниковим заповнювачем типу ІСП-1 і обшивкою на основі склотканини Т42/1-76 мав п'ять характерних ділянок — бездефектну і чотири ділянки з різним ступенем пошкодження. Моделями дефектів служили ділянки, по яким попередньо за допомогою сталеві кульки

було завдано точкового удару з нормованою енергією $A_{уд}$, рівною 2,3 кДж (дефект 1), 2,8 кДж (дефект 2), 3,2 кДж (дефект 3) та 5,1 кДж (дефект 4), який спричиняв руйнацію поверхні зразка в області контакту.

Для кожного з чотирьох отриманих зразків з дефектами та бездефектного зразка було отримано по 100 реалізацій імпульсів ударної взаємодії. В якості діагностичних ознак використовувались такі параметри як амплітуда, тривалість імпульсу, а також форма інформаційного сигналу. Зміна вказаних параметрів дає можливість визначати наявність дефекту стільникової панелі і класифікувати його тип за ступінню пошкодження.

В процесі контролю на вхід мережі в випадковому порядку подавався один з отриманих сигналів. Після цього він видалявся з вибірки і на вхід мережі подавався новий сигнал з вибірки. Дана процедура повторювалася до тих пір, поки всі сигнали з вибірки не були пред'явлені нейронній мережі. Сформувавши базу класів, для дослідження достовірності формування класів та результатів НК мережі було пред'явлено по 100 нових сигналів, характерних для кожної ділянки досліджуваних зразків. Після пред'явлення всієї контрольної вибірки сигналів було проаналізовано отримані результати роботи для кожної архітектури нейронної мережі (таблиця).

Порівняльний аналіз розроблених нейронних мереж

Показник	Тип нейронної мережі				
	Мережа Кохонена	БШП	Гібридна мережа	АРТ-2	Fuzzy-ART
Необхідність навчальної вибірки	Ні	Так	Ні	Ні	Ні
Швидкість навчання, с	5,3	0,2	5,7	1,5	2,1
Достовірність контролю	0,88...0,93	0,98...0,99	0,96...0,98	0,98...0,99	0,97...0,99
Можливість визначити нові (аномальні) об'єкти	Ні	Ні	Так	Так	Так
Час класифікації вибірки, мс	1740	2210	2210	1530	2103
Обсяг пам'яті для зберігання мережі, кБ	64	81	219	203	115



З таблиці видно, що нейронна мережа ART-2 має найкращі показники, може автоматично розширювати власну базу знань про можливі дефекти досліджуваних об'єктів, а також характеризується найбільшою достовірністю контролю — 99 %. Даний тип нейронної мережі рекомендується застосовувати у спеціальних системах НК композитів.

Висновок

Розглянуто найбільш відомі архітектури та типи нейронних мереж, а саме такі нейронні мережі, як БШП, мережа Кохонена, гібридна нейронна мережа та мережі сімейства ART, та їх можливість застосування в системах НК. Описано їх структуру, алгоритми роботи та навчання.

Зазначимо, що нейронні мережі мають такі особливі властивості, як самоорганізація, здатність до навчання в процесі роботи, узагальнення, імітування процесів та явищ, в тому числі і нелінійних, формування складних залежностей в просторі діагностичних ознак і в просторі класів, ефективність роботи з ознаками великої розмірності, що обумовлюють доцільність їх використання для вирішення задач діагностики та НК виробів, зокрема композиційних матеріалів.

Для вибору оптимальної архітектури нейронної мережі, яку можна рекомендувати для використання у складі класифікатора системи НК виробів з композиційних матеріалів, проведено практичний аналіз результатів застосування перелічених нейронних мереж. В результаті визначено, що у випадку появи невідомого раніше нового об'єкту гібридній нейронній мережі потрібен додатковий час для формування нового класу і фактично відбувається повне її перенавчання. Застосування класифікатора на основі БШП не можливе при вирішенні задач безеталонної діагностики композиційних матеріалів, оскільки номенклатура можливих дефектів виробів з композитів невідома. Для БШП необхідна початкова навчальна вибірка, до того ж БШП не може динамічно розширювати власну базу знань і адаптуватися до появи об'єктів, які відносяться до невідомих раніше класів. Експериментально визначена достовірність роботи класифікатора на основі нейронної мережі Кохонена при вирішенні задач безеталонного контролю виробів із композиційних матеріалів не перевищує показника 93 %. Виходячи з результатів аналізу рекомендовано застосовувати в якості ядра класифікатора нейронні мережі ART-2 та Fuzzy-ART, оскільки дані мережі дозволяють усунути описані недоліки та забезпе-

чують високий показник достовірності контролю (0,98...0,99) по відношенню до таких мереж, як нейронна мережа Кохонена, БШП та гібридна нейронна мережа на основі мережі, Кохонена та БШП.

Розроблено спеціальне програмне забезпечення системи НК виробів з композиційних матеріалів з використанням розглянутих нейронних мереж, що може використовуватись з такими методами діагностики, як метод низькошвидкісного удару, імпедансний метод, ультразвуковий, вільних коливань, вихрострумний тощо.

Приведены результаты использования нейронных сетей для решения задач неразрушающего контроля изделий из композитных материалов. Описаны структура, алгоритмы обучения и работы нейронной сети Кохонена, многослойного перцептрона, гибридной нейронной сети, а также сетей адаптивной резонансной теории.

1. Бархатов В. А. Обнаружение сигналов и их классификация с помощью распознавания образов // Дефектоскопия. — 2006. — № 4. — С. 14–27.
2. Бархатов В. А. Распознавание дефектов с помощью искусственной нейронной сети специального типа // Там же. — 2006. — № 2. — С. 28–39.
3. Найденко А. Г. Визначення надійності різців з алмазних композиційних НТМ шляхом реєстрації та аналізу акустичної емісії: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Київ, 2009. — 20 с.
4. Зажичий О. В. Розпізнавання нейронними мережами стану лопаток авіаційних двигунів у процесі віброакустичного моніторингу: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Київ., 2008. — 20 с.
5. Kohonen T. Self Organization and Associative Memory. — New York : Springer—Verlag, 1989. — 147 p.
6. Переїденко А. В., Єременко В. С. Дослідження алгоритмів проведення кластерного аналізу для вирішення задач неруйнівного контролю // Вост.-Европ. журн. передових технологій. — 2010. — № 1/5(43). — С. 40–43.
7. Хайкин С. Нейронные сети: 2-е изд. / Пер. с англ. — М.: Изд. дом «Вильямс», 2006. — 1104 с.
8. Переїденко А. В., Єременко В. С., Роганьков В. О. Нейромережева система діагностики виробів авіаційного призначення // Вісн. Нац. авіац. ун-ту. — 2011. — № 2(47). — С. 88–95.
9. Переїденко А. В., Єременко В. С., Павленко Ж. О. Система класифікації дефектів на основі штучних нейронних мереж // Вісн. НТУУ «Київ. політехн. ін-т». — 2010. — № 40. — С. 72–80.
10. Єременко В. С., Мокійчук В. М., Овсянкіна А. М. Обнаружение ударных повреждений сотовых панелей методом низкоскоростного удара // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2007. — № 1. — С. 24–27.
11. Carpenter G. A., Grossberg S. ART 2: Stable self—organization of pattern recognition codes for analog input patterns // Applied Optics. — 1987. — № 26. — P. 4919–4930.
12. Carpenter G. A., Grossberg S., Rosen D. B. Fuzzy ART: Fast stable learning and categorization of analog patterns by an adaptive resonance system // Neural Networks. — 1991. — № 4. — P. 759–771.

Надійшла до редакції
22.10.2011

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК, МІКРОСТРУКТУРИ ТА ІНФОРМАТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

М. О. КАРПАШ, канд. техн. наук (Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України)

Встановлено залежність між механічними характеристиками, мікроструктурою та інформативними параметрами неруйнівного контролю. Запропоновано метод визначення межі плинності та межі витривалості шляхом послідовного вимірювання теплопровідності, питомого електричного опору, визначення мікроструктури за їх значеннями та розрахунку механічних характеристик за допомогою нейронних мереж.

Article aimed on establishment of relationship between mechanical properties, microstructure and informative parameters of non-destructive testing. Method for determination of yield strength and tensile strength using sequential measurement of thermal conductivity, electric resistivity, determination of microstructure using these values and calculation of mechanical properties using neural networks.

Можливість визначення фактичних механічних характеристик матеріалу металоконструкцій тривалої експлуатації чи їх зміни, як правило, цікавить фахівців, які відповідають за безпечність експлуатації. Це особливо важливо для попередження аварій, надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру, що можуть призвести до руйнувань та пошкоджень відповідальних металоконструкцій (ТЕС, АЕС, нафтогазове устаткування для робіт на суші, шельфі та значній глибині тощо). Серед фахівців превалює думка [1], що існуючі методи НК ще не можуть забезпечити достовірного визначення міцнісних характеристик в експлуатаційних умовах. Слід сказати, що інструментарій розроблених методів та засобів НК механічних характеристик (твердість, межа плинності та межа витривалості) є доволі небагатим, обмежується, як правило, визначенням твердості поверхневого шару матеріалу, коерцитивної сили, магнітної проникності та не може в повній мірі відповідати вимогам, що постають у цій сфері [2]. Очевидно, що вказані обставини дають підстави змінити підхід до розв'язання задачі контролю механічних характеристик і перевести його в площину досліджень щодо встановлення їх взаємозв'язку із мікроструктурним станом та інформативними параметрами НК.

Питання взаємозв'язку мікроструктури сталей та їх механічних характеристик може бути розглянуте з позицій використання залежностей, що його описують, для вирішення актуальних на даний момент задач визначення фактичних фізико-механічних характеристик (ФМХ) матеріалів. Особливо це важливо для тих ситуацій, коли єдиною альтернативою визначення ФМХ є застосування неруйнівних методів.

Відомо, що саме ця ситуація відповідає стану справ із згаданими потенційно небезпечними об'єктами тривалої експлуатації, до яких застосовними є виключно методи НК, а також доведеними є процеси зміни їх ФМХ в часі. Слід зауважити, що з огляду на значну кількість чинників впливу характер таких змін важко пояснити, а їх прогнозування за таких умов стає практично неможливим [3]. Відомо також, що зміні ФМХ передують зміни мікроструктурного стану, яка на етапі виготовлення конструкцій визначається хімічним складом сталі та технологічною послідовністю термомеханічного оброблення.

Метою даної роботи є спроба встановлення залежності між мікроструктурним станом конструкційних сталей, інформативними параметрами НК та їх ФМХ.

Раніше [4] автором під час пошуку нових інформативних параметрів для визначення НК ФМХ було виявлено цікаве явище, яке полягає у наступному. Здійснювалось перевіряння закону Відемана—Франца та закону Грюнайзена [5] на відомостях про фізичні властивості та механічні характеристики наступних іноземних марок нержавіючих сталей: 301, 304, 310, 321, 347, 409, 410, 416, 420, 430, 430F, 440, 431, 630, 904L, UR52N+, 2205, 3CR12, 253MA. За мікроструктурним станом вони представляли мартенситні, феритні, аустенітні та дуплексні (феритно-аустенітні) сталі.

Було встановлено, що значеннями відношення коефіцієнта температурного розширення до теплоємності (відповідно до закону Грюнайзена) та відношення теплопровідності до питомого електричного опору (за законом Відемана—Франца) сталі розподілились за мікроструктурними групами — мартенситні та феритні, дуплексні та аустенітні (рис. 1). Таке припущення підтверджується аналогічним розподілом на структурні

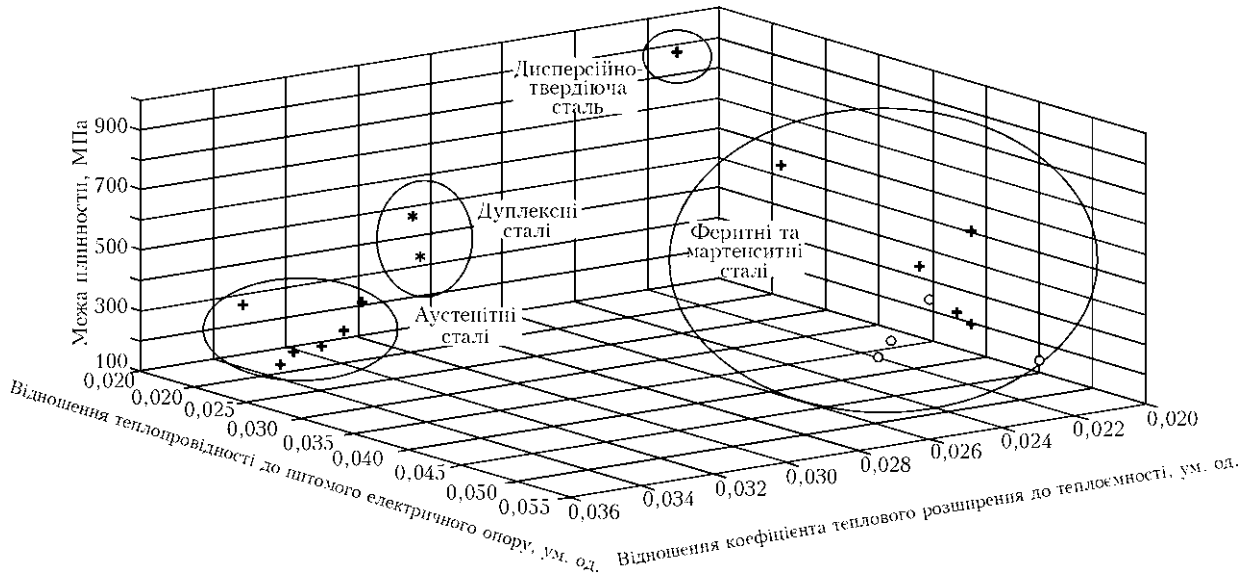


Рис. 1. Розподіл структурних груп сталей за відношеннями теплопровідності до питомого електричного опору та коефіцієнта теплового розширення до теплоємності

групи сталей за значеннями коефіцієнта теплопровідності та питомого електричного опору (рис. 2).

Характерною особливістю показаних розподілів на рис. 1 та 2, є те, що для різних структурних груп різними є діапазони значень межі плинності (як базової механічної характеристики), а також візуальна відмінність залежностей цієї характеристики від інформативних параметрів. Очевидно, що дане явище дозволяє стверджувати, що фізичні властивості сталей (особливо питомий електричний опір та теплопровідність) можуть бути використані як структурно-чутливі, а отже як інформативні для контролю ФМХ сталей.

З метою встановлення залежностей між межею плинності та межею міцності, з одного боку, та твердістю, питомим електричним опором і теплопровідністю, з другого, було вирішено звернутись до нормативних документів на виготовлення

сталей. На жаль, у вітчизняних джерелах [6] відомості про механічні та фізичні характеристики щодо основних конструкційних сталей носять неоднозначний характер — вказується діапазон значень того чи іншого параметра, а не конкретне число; щодо деяких фізичних параметрів відомості взагалі відсутні. Тому було використано відомості щодо ряду зі 142 іноземних марок сталей [7], які були вибрані з різними типами структур: 1) аустенітні (вибрано 88 марок); 2) феритні (вибрано 12 марок); 3) дуплексні (вибрано 26 марок); 4) мартенситні (вибрано 16 марок).

Для вказаних сталей згідно з системою нормативних документів серії ASTM нормуються такі величини: межа міцності, межа плинності, твердість, густина, коефіцієнт теплового розширення, теплопровідність, теплоємність і питомий електричний опір.

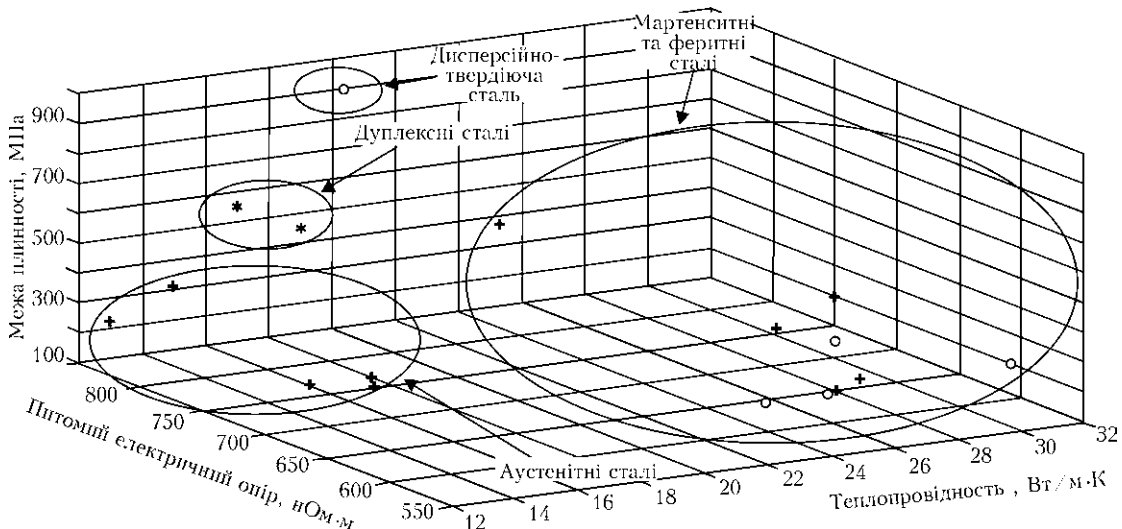


Рис. 2. Розподіл структурних груп сталей за значеннями питомого електричного опору та теплопровідності

Таблиця 1. Результати розрахунку коефіцієнта K

Структура сталей	Середнє значення коефіцієнта $K \cdot 10^{-6}$, ум.од	Діапазон значень коефіцієнта $K \cdot 10^{-6}$, ум.од
Аустенітна	12,05	9,9...13,6
Дуплексна	12,55	11,8...13,6
Мартенситна	15,45	13,7...18,0
Феритна	15,72	14,0...17,7

Наведемо діапазони зміни вибраних параметрів: межа міцності 400...2200 МПа; межа плинності 145...1800 МПа; твердість HV_{140} ...332; теплопровідність 9,1...32,3 Вт/м·К; питомий електричний опір 500...1450 нОм·м.

Неоднозначність характеру залежностей вказаних параметрів наштовхнула на припущення про структурну чутливість цих параметрів та можливість дослідження взаємозв'язку мікроструктури із механічними характеристиками. Відомості щодо досліджуваних марок сталей також містили і тип їх мікроструктури (мартенситна, феритна, аустенітна та дуплексна). Далі, відповідно до раніше запропонованого підходу [12], було запропоновано розрахувати деякий усереднений коефіцієнт K для всіх марок сталей для кожної структури окремо за формулою:

$$K = \rho \lambda, \quad (1)$$

де ρ — питомий електричний опір, Ом·м; λ — коефіцієнт теплопровідності, $\frac{\text{Вт} \cdot \text{м}}{\text{К}}$.

Таким чином, розмірність даного коефіцієнта $\frac{\text{Вт} \cdot \text{Ом}}{\text{К}}$.

Введення коефіцієнта має за мету дослідити можливість якісної оцінки структури контрольованих сталей. Результати розрахунку введеного коефіцієнта K наведено в табл. 1.

Як видно з табл. 1, значення коефіцієнта K відрізняється для різних типів структури сталей. Причому найбільше абсолютне значення даного коефіцієнта відповідає феритним сталям, а найменше — аустенітним. Проте чітко ідентифікувати приналежність певної марки сталі до тієї чи іншої

структури можна тільки для двох груп сталей. До першої належать аустенітні та дуплексні сталі, до другої — мартенситні та феритні сталі.

Про взаємозв'язок електропровідності та теплопровідності металів було відомо давно [5], що пояснюється тим, що обидві ці властивості металів зумовлені, в основному, рухом електронів провідності. Проте, закон Відемана—Франца виконується тільки для чистих металів і його не можна використовувати для сталей, які є складною механічною сумішшю заліза, вуглецю та легуючих елементів.

Різниця в розрахованих значеннях введеного коефіцієнта K для різних структур наштовхнула на думку про доцільність застосування додаткових методів оброблення інформації для встановлення наявності взаємозв'язку між механічними характеристиками (межею плинності та межею міцності) та вибраними параметрами для всіх типів структур окремо.

Значення коефіцієнтів кореляції між досліджуваними параметрами розраховані в середовищі MATLAB 7.3.0 для всіх типів структур і подані в табл. 2.

Аналіз одержаних коефіцієнтів кореляцій показав, що:

- коефіцієнти кореляції досліджуваних параметрів для окремих типів структур (за винятком мартенситних сталей) в цілому виявилися кращими за коефіцієнти кореляції для всіх марок сталей разом;

- знак « \leftrightarrow » свідчить про те, що залежність коефіцієнта теплопровідності від межі міцності, межі плинності є обернено пропорційною;

- найкраща кореляція коефіцієнта теплопровідності і питомого електричного опору з межею міцності/плинності та твердістю спостерігається для феритних та дуплексних сталей;

- загалом невисокі значення коефіцієнтів кореляції можуть пояснюватися нелінійністю взаємозв'язків між досліджуваними параметрами.

Враховуючи те, що вказана нелінійність пояснюється сумісним та нерівномірним впливом багатьох чинників, доцільно застосовувати алгоритми штучних нейронних мереж (ШНМ) для вирішення задачі багатопараметрової апроксимації

Таблиця 2. Коефіцієнти кореляції досліджуваних параметрів для досліджуваних мікроструктурних груп сталей

Структурна група	Кореляція			
	між теплопровідністю та межею плинності	між теплопровідністю та межею міцності	між питомим електричним опором та межею плинності	між питомим електричним опором та межею міцності
Всі структурні групи	-0,1344	-0,0379	-0,1381	-0,0532
Аустенітна	-0,1241	-0,1813	0,2901	0,3748
Дуплексна	-0,6820	-0,6848	0,7597	0,7294
Феритна	-0,6939	-0,7404	0,8034	0,8248
Мартенситна	0,0238	0,0204	0,2335	0,2119



Таблиця 3. Результати тестування нейронної мережі

Набір даних	Номер сталевого зразка								Похибка тестування	
	1	2	3	4	5	6	7	8	абсолютна, МПа	відносна, %
Дійсні значення межі плинності	275	310	485	280	450	275	350	560	—	—
1-й: реальні виходи нейронної мережі	271	313	492	283	430	—	—	—	2,3	1,04
2-й: реальні виходи нейронної мережі	—	—	—	—	—	273	384	562	11,6	4,01
3-й: реальні виходи нейронної мережі	276	316	483	273	379	422	345	478	40,1	19,1

межі плинності/міцності від таких інформативних параметрів, як коефіцієнт теплопровідності, твердість та питомий електричний опір. Детально про можливості та доцільність застосування алгоритмів штучних нейронних мереж вказувалося раніше [8].

З усіх марок сталей було сформовано три окремих набори тренувальних та тестових даних:

- 1-й набір включає аустенітні та дуплексні сталі (кількість марок для тренування мережі — 90, для тестування — 5);
- 2-й набір включає феритні та мартенситні сталі (кількість марок для тренування мережі — 37, для тестування — 3);
- 3-й набір включає сталі всіх типів структур (кількість марок для тренування мережі — 127, для тестування — 8);

Необхідно зазначити, що згідно із прийнятою практикою [9], тестування нейронних мереж виконують на даних, що не використовувались під час навчання (невідомі для нейронної мережі) — таким чином забезпечується об’єктивність судження про здатність мережі до апроксимації необхідної функції та відповідає умовам контролю.

Підготовка даних (як вхідних, так і вихідних) здійснювалась за стандартною процедурою нормування для одержання значень параметрів у межах (0 1). Як тренувальний алгоритм, в усіх мережах використовували алгоритм Левенберга–Марквардта [8], який використовується для тренування невеликих мереж і характеризується швидким сходженням. Нейронна мережа заданої будови тренувалась для розв’язання задачі апроксимації межі плинності як функції двох інформативних параметрів (питомого електричного опору та коефіцієнта теплопровідності).

Шляхом проведення тренувань та тестувань нейронних мереж різних архітектур, визначено, що найкраще здатною до апроксимації виявилася ШНМ з архітектурою 20×10×1. Ця архітектура означає, що в першому прихованому шарі міститься 20 нейронів, у другому — 10, у вихідному — 1. Результати тестування натренованих мереж для трьох наборів даних наведено в табл. 3.

За результатами, наведеними в табл. 3, можемо зробити такі висновки:

1) використання штучних нейронних мереж дозволяє встановлювати взаємозв’язки між інформативними параметрами (теплопровідність, питомий електричний опір) та досліджуваними характеристиками (межа плинності) за низьких значень коефіцієнтів кореляції між ними;

2) визначення ФМХ сталей в межах груп із однаковою або схожою структурами дозволяє суттєво підвищити точність визначення ФМХ, що узгоджується із відомим зв’язком між структурним станом сталей та їх механічними характеристиками;

3) отримані результати підтверджують вибір інформативних параметрів контролю — теплопровідності та питомого електричного опору, структурна чутливість яких була обґрунтована раніше.

Таким чином, в результаті проведених досліджень розроблено метод визначення механічних характеристик, суть якого полягає у виконанні наступних етапів:

- визначення за відношенням теплопровідності до електропровідності (згідно закону Відемана–Франца) до якої групи за мікроструктурою належить той чи інший матеріал;

- в межах структурної групи визначаються ФМХ (наприклад, межа плинності) шляхом врахування комплексу інформативних параметрів — твердості, теплопровідності та питомого електричного опору з використанням штучних нейронних мереж.

У подальшому на цьому підґрунті було розроблено два нових методи визначення ФМХ сталей, що дозволяли визначати межу плинності та межу витривалості шляхом:

- сумісного вимірювання теплопровідного інформативного параметру та твердості [10];

- вимірювання питомого електричного опору чотирьохконтактним методом та твердості [11].

В результаті проведеної роботи було досягнуто можливості вимірювання фізичних властивостей на реальних зразках металоконструкцій обмежених розмірів, що постало базою для подальших досліджень.



Експериментальна перевірка залежності мікроструктури від запропонованих інформативних параметрів (питомий електричний опір та теплопровідність) проводили шляхом дослідження, що передбачало послідовне визначення мікроструктури сталевих зразків, визначення неруйнівними методами твердості, теплопровідності та питомого електричного опору.

Метою термічного оброблення зразків є отримання експериментальних зразків, що мають різні мікроструктури для встановлення закономірностей інформативних параметрів НК від зміни мікроструктури сталей.

Із великогабаритного сталевого листа (матеріал — сталь 45) за допомогою гільйотини було вирізано три зразки розмірами: довжина — 280 мм, ширина — 180 мм, товщина — 10 мм та три зразки-свідки розмірами: довжина — 90 мм, ширина — 60 мм, товщина — 10 мм. Один повнорозмірний зразок та один зразок-свідок залишені в стані поставки. Інші повнорозмірні зразки та відповідні їм зразки-свідки з метою зміни структури пройшли наступні режими термічної обробки:

- відпал 820...840 °С (витримка 20...30 хв; охолодження в печі);
- загартування 820...840 °С (витримка 20...30 хв; охолодження у воді або оливі).

Повнорозмірний зразок та зразок-свідок у стані поставки промарковані клеймом «0», відпалений зразок та відповідний йому зразок-свідок — клеймом «1», загартований зразок та відповідний йому зразок-свідок — клеймом «2».

З метою визначення мікроструктури термооброблених повнорозмірних зразків було проведено металографічні дослідження на відповідних зразках-свідках.

Для вивчення мікроструктури термооброблених зразків було використано мікроскоп серії MT8500 з високоякісною оптичною системою MEIJI TECHNO Planachromat Epi ICOSTM, скоректованою на «безкінечність» (рис. 3).

Наявність можливих дефектів (тріщин) термічного оброблення на зразках перевірялася за допомогою УЗ дефектоскопа УД2-70 та ДІО-562. Методика акустичної дефектоскопії передбачала проведення попереднього настроювання УЗ апаратури на зразках зі штучними дефектами.

Далі передбачалось, що за значенням добутку виміряних значень коефіцієнта теплопровідності та питомого електричного опору визначається

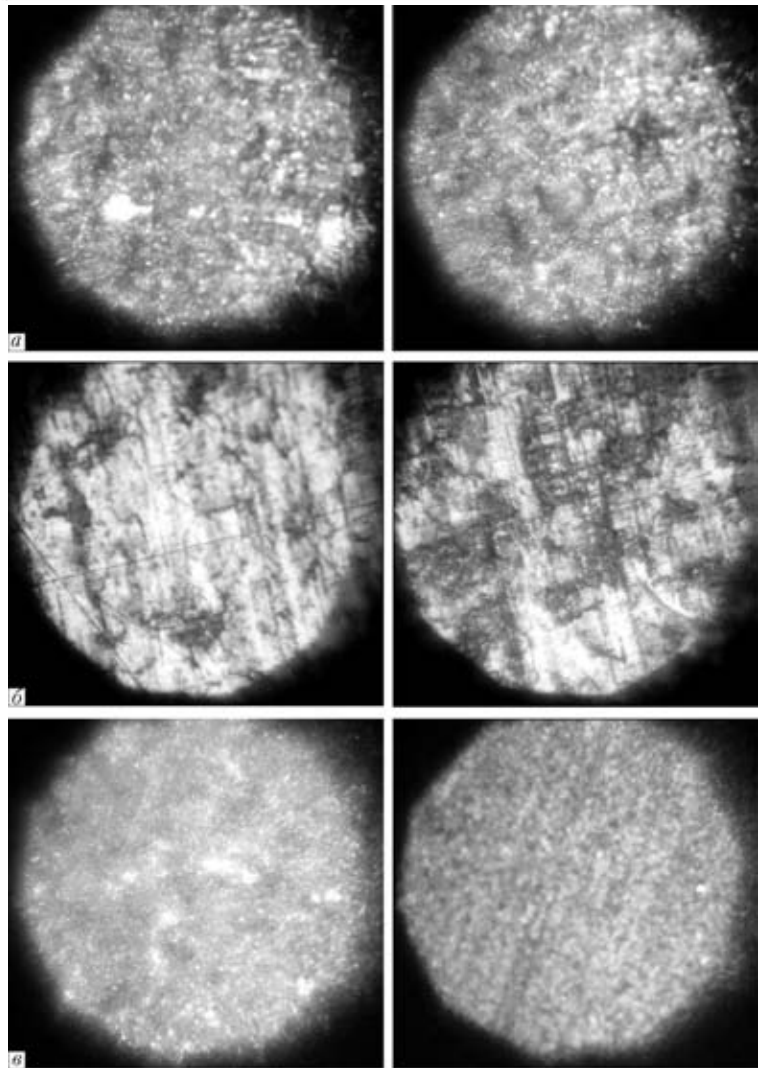


Рис. 3. Мікроструктурні зображення шліфів у стані поставки (а), відпаленому (б) та загартованому станах (в), отримані за допомогою мікроскопа серії MT8500

приналежність марки сталі до того чи іншого типу структури.

Всі зразки поділені на шість зон розміром 90×90 мм. Вибір розмірів ділянок зумовлений габаритами перетворювачів коерцитиметра, індуктометра та лабораторної установки для вимірювання теплопровідного параметра, а їх кількості — з міркувань отримання адекватних статистичних оцінок результатів вимірювань, врахування та зменшення впливу крайових ефектів, а також можливої структурної анізотропії. В кожній зоні на всіх зразках для забезпечення адекватності результатів досліджень буде проведено семикратні вимірювання всіма технічними засобами.

На відібраних трьох термооброблених повнорозмірних зразках (в стані поставки, відпалений та загартований) зі сталі 45 було проведено вимірювання з метою визначення наступних інформативних параметрів: теплопровідна характеристика, твердість, коерцитивна сила, індуктивний параметр та електричний опір. Вимірювання ін-

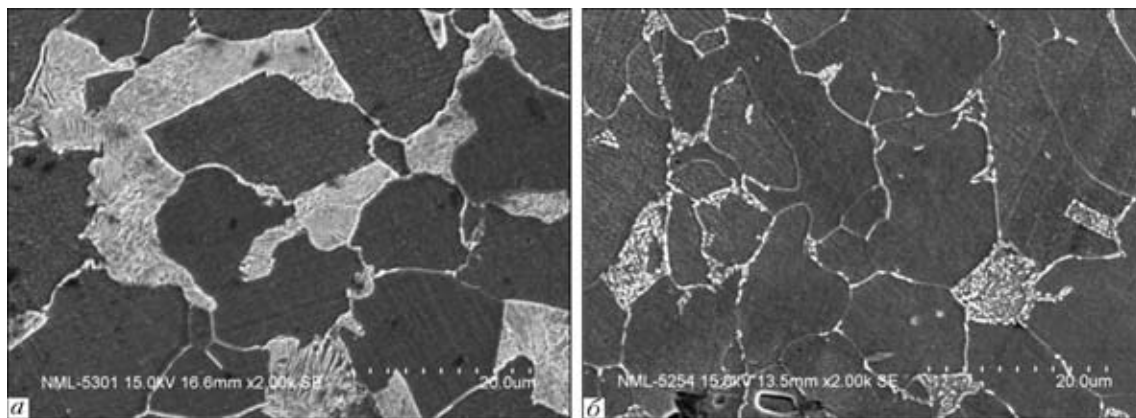


Рис. 4. Різні типи мікроструктур трубних сталей: а — феритно-перлітна; б — феритна структура

формативних параметрів (окрім електричного опору) проводилися в кожній із шести зон.

Усереднені результати вимірювань інформативних параметрів на повнорозмірних термооброблених зразках наведені в табл. 4.

Раніше встановлено, що належність зразка сталі до певного типу мікроструктури можна визначити за формулою (1).

Тепер згідно з запропонованим методом зробимо спробу визначити мікроструктуру термооброблених зразків (в стані поставки, відпалений та загартований). При цьому замість питомого електричного опору використаємо значення електричного опору R , а замість коефіцієнта теплопровідності — теплопровідний параметр T , який залежить від фактичних значень теплопровідності. Вираз (1) можна переписати наступним чином:

$$K = RT. \tag{2}$$

Підставляючи значення для R і T з табл. 4 у вираз (2), одержимо значення коефіцієнта K для трьох сталевих зразків, що мають різні мікроструктури:

- в стані поставки $K = 14,203$ ум.од;
- у відпаленому стані $K = 14,224$ ум. од;
- у загартованому стані $K = 16,018$ ум.од.

Аналогічна ситуація спостерігалась на зразках трубних сталей, що досліджувались з метою виявлення залежності між теплопровідною характеристикою [12] та питомим електричним опором [13] із межею плинності трубних сталей. Наприклад, значення добутку питомого електричного опору та теплопровідної характеристики суттєво відрізняються для феритно-перлітної та феритної структури на різних зразках до 30 %. Зображення двох типових мікроструктур, отриманих у співпраці із Національною металургійною лабораторією (м. Джемшедпур, Індія) показані на рис. 4.

Таким чином, згідно із запропонованим методом, встановлено можливість чіткої якісної ідентифікації мікроструктур сталей за значеннями

Таблиця 4. Результати експериментальних досліджень на термооброблених зразках

Інформативний параметр	Середнє значення інформативного параметра зразка		
	в стані поставки	відпаленого	загартованого
Твердість, HB	156	132	422
Теплопровідний параметр, ум. од	6,310	6,522	6,557
Електричний опір, мОм	2,251	2,181	2,443

питомого електричного опору та теплопровідності, що було запропоновано за результатами теретичних досліджень.

Висновки

Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено можливість ідентифікації мікроструктури сталей за допомогою комплексу інформативних параметрів — теплопровідності та питомого електричного опору, які у сукупності зі значенням твердості дозволяють визначати неруйнівним способом значення механічних характеристик.

Потребує наукового обґрунтування та глибокого дослідження явище залежності сумісної залежності теплопровідності та питомого електричного опору сталей від їх мікроструктури з матеріалознавчої точки зору.

Запропонований метод потребує подальшого розвитку з позицій переходу до кількісної оцінки мікроструктурного стану сталей та встановлення наявності та характеру залежностей у багатовимірному просторі мікроструктури, механічних характеристик та фізичних властивостей.

Определена зависимость между механическими характеристиками, микроструктурой и информативными параметрами неразрушающего контроля. Предложен метод определения предела текучести и предела прочности путем последовательного измерения теплопроводности, удельного электрического сопротивления, определения



микроструктуры по их значениям и расчета механических характеристик с помощью нейронных сетей.

1. *Оценка прочностного ресурса газопроводных труб с коррозионными повреждениями: Уч. пособ. / И. Н. Бирилло, А. Я. Яковлев, Ю. А. Теплинский и др. // Под ред. И. Ю. Быкова. — М.: ЦентрЛитНефтеГаз, 2008. — 168 с.*
2. *Постанова Кабінету Міністрів України від 8 жовтня 2004 р. № 1331 «Про затвердження Державної науково-технічної програми «Ресурс» (<http://zakon.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi?inreg=1331-2004-%EF>).*
3. *Быков И. Ю., Цхадая Н. Д. Эксплуатационная надежность и работоспособность нефтегазопромысловых и буровых машин. — М.: ЦентрЛитНефтеГаз, 2010. — 304 с.*
4. *Карпаш О. М., Молодецкий И. А., Карпаш М. О. Общий обзор методов оценки физико-механических характеристик металлов // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2004. — № 2. — С. 18–22.*
5. *Ашкрофт Н., Мермин Н. Физика твердого тела. — В 2 т. Т 1. — М.: Мир, 1979. — 420 с.*
6. *Марочник сталей и сплавов / В. Г. Сорокин, А. В. Волосникова, С. А. Вяткин и др. // Под общ. ред. В. Г. Сорокина. — М.: Машиностроение, 1989. — 640 с.*
7. <http://www.matweb.com>
8. *Карпаш М. О. Обґрунтування комплексного підходу до визначення фізико-механічних характеристик матеріалу металокопункцій // Методи та прилади контролю якості. — 2004. — № 12. — С. 30–33.*
9. *Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. — М.: Вильямс, 2006. — 1104 с.*
10. *Розроблення методу та засобу визначення фізико-механічних характеристик матеріалу металокопункцій довготривалої експлуатації / Автореф. дис... канд. техн. наук / М. О. Карпаш; Нац. ун-т «Львів. політехніка». — Л., 2006. — 20 с.*
11. *Контроль механических характеристик конструктивных сталей за їх питомим електричним опором / Автореф. дис... канд. техн. наук // Є. Р. Доценко; Івано-Франк. нац. техн. ун-т нафти і газу. — Івано-Франківськ, 2006. — 20 с.*
12. *Застосування комплексного підходу до визначення фізико-механічних характеристик нафтогазового обладнання / М. О. Карпаш, І. С. Кісіль, О. М. Карпаш, І. А. Молодецький // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2006. — № 2. — С. 49–52.*
13. *Доценко С. Р., Карпаш М. О., Карпаш О. М. Дослідження методу визначення напруження плинності конструкційних сталей за значеннями їх питомого опору // Методи та прилади контролю якості. — 2010. — № 24. — С. 105–111.*

*Надійшла до редакції
01.06.2012*

НОВАЯ КНИГА

Неразрушающий контроль в Украине: Справочник / Под ред. В. А. Троицкого и Ю. Н. Посьпайко. — Киев: Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики, 2012. — 144 с.

Приведены сведения об организациях Украины, связанных с использованием физических методов неразрушающего контроля (акустических, радиационных, электромагнитных, проникающих веществ и др.) для оценки качества материалов и ответственных сооружений, о предприятиях, изготавливающих и поставляющих приборы, материалы и оборудование для дефектоскопии и технической диагностики, осуществляющих подготовку и сертификацию специалистов по неразрушающему контролю, а также о стандартизации и метрологии в области неразрушающего контроля. Приведена информация об Украинском обществе неразрушающего контроля и технической диагностики, итогах профессиональных конкурсов, научных конференциях, практических семинарах и других мероприятиях, которые проводятся в Украине для пропаганды физических методов неразрушающего контроля качества ответственных сооружений.

По вопросу приобретения справочника просьба обращаться в редакцию журнала «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»

СБОР, НАКОПЛЕНИЕ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ДАННЫХ МОНИТОРИНГА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

С. К. ФОМИЧЕВ, д-р техн. наук, **А. Е. ПИРУМОВ**, канд. техн. наук, **С. Н. МИНАКОВ**, **А. С. МИНАКОВ**,
А. В. ДАНИЛЬЧИК, **С. В. МИХАЛКО**, инженеры (Нац. техн. ун-т Украины «КПИ»),
М. А. ЯРЕМЕНКО, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены структура и функциональные возможности автономной системы дистанционного мониторинга напряженного состояния магистральных трубопроводов. Система предназначена для измерения продольных нормальных напряжений с помощью магнитоанизотропных преобразователей, передачи и приема данных по каналам GSM-связи в диспетчерскую контролирующий организации с последующим анализом эпюр напряжений и графической интерпретацией данных во времени.

The paper deals with the structure and functional capabilities of a self-sufficient system of remote monitoring of stressed state in the main pipelines. The system is designed for measurement of longitudinal normal stresses using magnetoanisotropic transducers, data transmission and reception through GSM communication channels to the control room of the monitoring organization with subsequent analysis of stress epures and graphic interpretation of the data in time.

Одной из задач обеспечения безаварийной эксплуатации магистральных трубопроводов (МТ) является мониторинг их напряженного состояния. В процессе эксплуатации напряжения МТ изменяются в результате действия таких механических факторов, как перемещение грунта; влияния водных преград; сезонные изменения климатических условий; неравномерное заземление грунта. Особенно актуальным является контроль технического состояния наиболее опасных участков — переходов трубопроводов через реки, железные и автомобильные дороги, вблизи населенных пунктов. Эти участки, как правило, являются более нагруженными, а экологический ущерб в случае утечки транспортируемого продукта многократно возрастает по сравнению с утечками на линейной части трубопровода.

После выбора опасных участков трубопровода [1] в последних устанавливаются системы мониторинга напряженного состояния [2], обеспечивающие:

- измерения параметров напряженно-деформированного состояния (НДС);
- передачу данных по каналам связи;
- обработку полученных данных и представление результатов в виде, удобном для принятия технологических решений.

Настоящая статья посвящена сбору, обработке и визуализации данных мониторинга НДС МТ.

Специалистами Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт» разработана и внедрена система дистанционного мониторинга напряженного состояния мостового перехода МТ. Годовой опыт эк-

сплуатации системы мониторинга показал правильность принятых технических решений, что позволило увеличить количество мостовых переходов, оснащенных указанными системами.

Система представляет собой сочетание аппаратной части и программного обеспечения.

Аппаратная часть для контроля мостового перехода трубопровода состоит из двух автономных узлов (рис. 1) для измерения и передачи данных о напряженном состоянии в сечении трубы и подробно описана в работе [2], а также стационарного сервера для приема, обработки и хранения данных, работающего под управлением ОС Windows и программного обеспечения семейства STAN.

Каждый из автономных узлов расположен на одном из берегов мостового перехода (рис. 2). Магнитоанизотропные преобразователи в специальных креплениях установлены в одном сечении трубопровода в начале компенсатора (рис. 3). Здесь же (в компенсаторе) расположены корпус

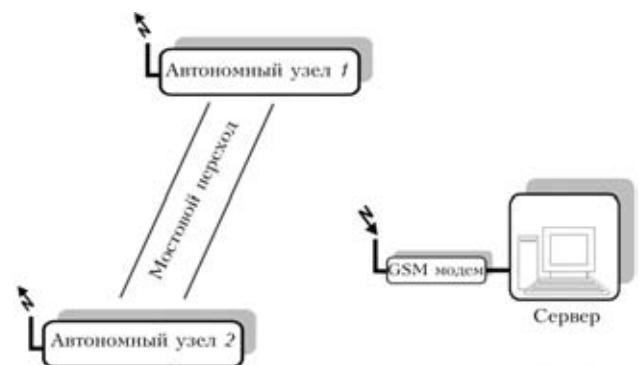


Рис. 1. Состав автономного узла системы мониторинга механических напряжений МТ с использованием GSM связи

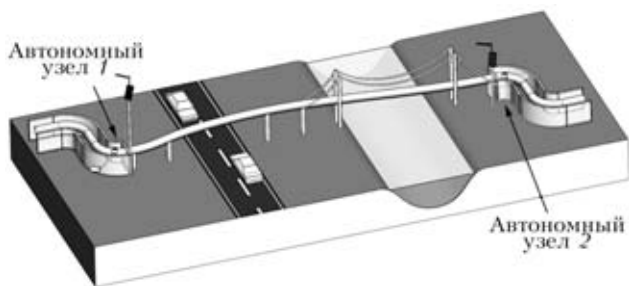


Рис. 2. Расположение автономных узлов на мостовом переходе трубопровода

блока обработки и измерения сигнала (с GSM модемом) и корпус аккумулятора (рис. 3).

Солнечная батарея с выносной антенной GSM модема расположены снаружи компенсатора на мачте (рис. 4). Автономный узел каждые три часа измеряет показания преобразователей, нормирует полученные данные и формирует SMS сообщение, которое посредством GSM модема отсылается на сервер.

Для получения SMS сообщений от автономных узлов посредством своего GSM модема, выполнения расчетов продольных напряжений и построения эпюр, проведения анализа эпюр для определения составляющих от осевых и изгибающих воздействий [3] предназначено программное обеспечение (ПО) STAN. ПО STAN (рис. 5), установленное на сервере, разработано в среде инженерного программирования LabVIEW, выбор которой обусловлен направленностью на использование в промышленных приложениях.

Текст SMS сообщения с данными мониторинга состоит из даты и времени отправки, шести показаний магнитоанізотропных преобразователей (в данном случае задействовано только четыре из них, что соответствует количеству преобразователей, установленных на трубе):

11/10/06 02:35:36,+0008,+0028,
-0102,+0021,+0000,+0000,+012,3V



Рис. 3. Расположение корпуса аккумулятора (1), корпусов блока обработки и измерения сигнала (2), креплений преобразователей (3)



Рис. 4. Мачта с солнечной батареей (показана стрелкой) и выносной антенной GSM модема в начале компенсатора мостового перехода



Рис. 5. Схема функциональных блоков ПО STAN

В основном окне программы (рис. 6) на стрелочных индикаторах отображаются рассчитанные продольные напряжения, а также существуют поля для отображения служебной информации, которая включает имя объекта наблюдения, номер телефона того же объекта, дату и время полученного SMS сообщения, а также его текст. Стрелочные индикаторы построены таким образом (цветная шкала), чтобы оператору было максимально удобно принимать решение про эксплуатацию объекта по его текущему состоянию. Количество индикаторов лицевой панели зависит от количества установленных датчиков на объекте и



Рис. 6. Лицевая панель основного окна программы

определяется автоматически. Полученные данные сохраняются в файл базы данных. Имя файла соответствует названию объекта. Основное окно программы является связующим между остальными блоками программы.

Для проведения анализа полученных данных предназначен блок программы обработки измеренных значений, который возможно вызвать из основного окна программы. Данный блок позволяет работать с файлами базы данных системы для расчета продольных, кольцевых, а также дополнительных продольных и изгибающих напряжений. В основном окне данного функционального блока (рис. 7) отображаются кривые, которые соответствуют средним за день значениям продольных напряжений по каждой дате, которая содержится в базе данных для каждого датчика отдельно. Можно заметить сезонные изменения уровня напряжений, вызванные температурой окружающей среды. Это вызвано изменением осевых нагрузок на трубопровод (от температуры) при сохранении изгибающих нагрузок (вызванных другими факторами). Для получения расчи-

танных данных предназначено меню Stress Analyze. При этом из выпадающего меню необходимо выбрать необходимую дату для получения рассчитанных значений.

В результате на экране монитора оператор имеет возможность увидеть окно Stress Analyze (рис. 8) с рассчитанными продольными напряжениями (поля Axial Stress), кольцевые напряжения (поле Hoop Stress), дополнительные продольные напряжения (поле Additional Axial Stress), сгибающие напряжения (поле Bend Stress). Навигация по данным, полученным в течение одного и того же дня происходит при помощи ползунка в нижней части окна.

Кроме того, оператор имеет возможность построить эпюры продольных напряжений. Для этого необходимо в главном окне блока обработки измеренных значений выбрать пункт Axial Stress (рис. 9).

Для задания основных параметров работы программы предназначен блок настройки параметров (рис. 10). Такими параметрами являются:

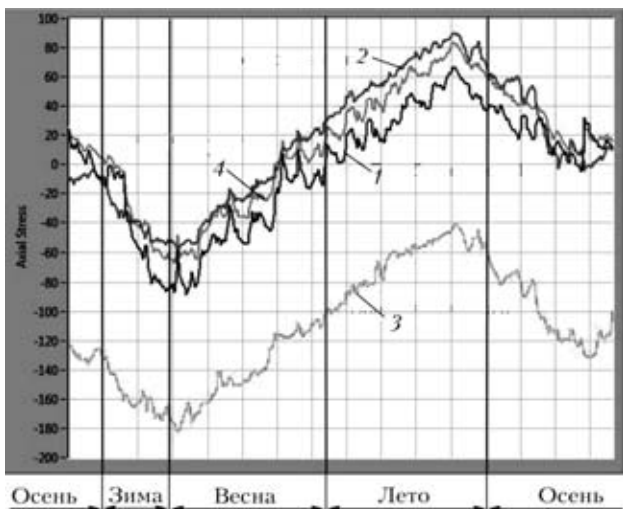


Рис. 7. Лицевая панель блока обработки измеренных значений одного из берегов перехода (1 – 4 — преобразователи)

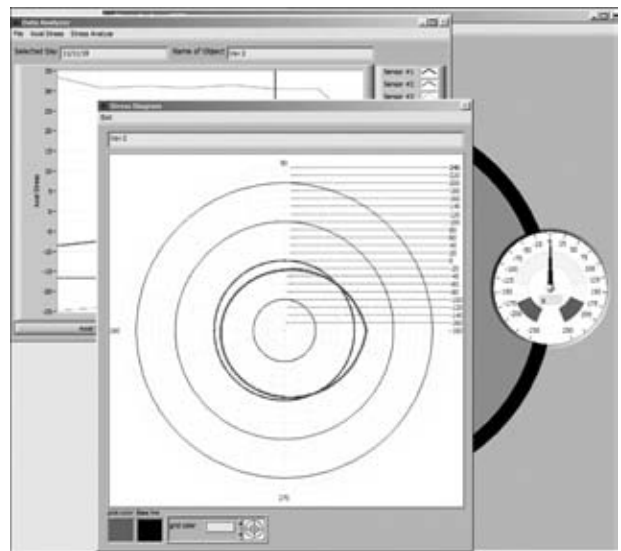


Рис. 9. Окно Axial Stress построения эпюр продольных напряжений

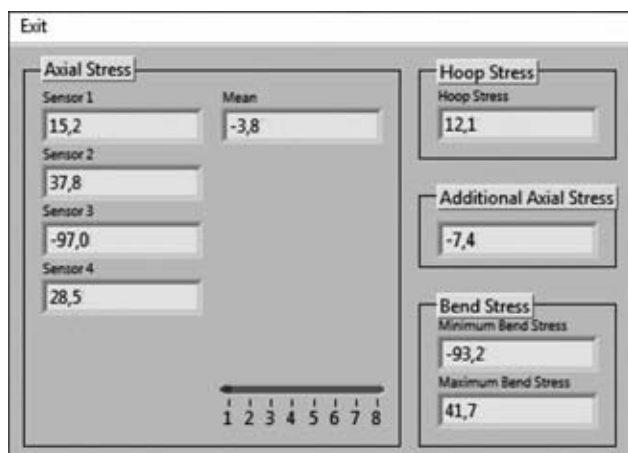


Рис. 8. Окно Stress Analyze

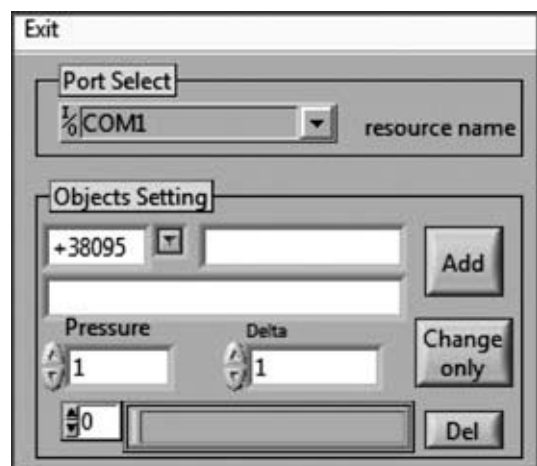


Рис. 10. Лицевая панель блока настройки параметров



последовательный порт, на который подключен GSM модем, а также параметры объекта: номер телефона модема, установленного на объекте, имя объекта, внутреннее давление в трубопроводе во время измерений в МПа, а также толщина стенки трубопровода. Введенные параметры сохраняются в памяти программы. Блок настройки позволяет удалять, изменять введенные параметры.

Кроме описанных основных возможностей программа имеет и ряд дополнительных, например, сохранение графических изображений эпюр в памяти компьютера, создание табличного отчета с рассчитанными значениями напряжений.

Выводы

Разработанное ПО STAN успешно применено для решения задач мониторинга напряженного состояния мостового перехода МТ в течение года работы.

Увеличение количества работающих автономных узлов системы мониторинга механических напряжений МТ по каналам GSM связи возможно с использованием ПО STAN.

1. *Обоснование методов обследования и выбор мест шурфовки магистральных газопроводов / Б. Е. Патон, А. Я. Недосека, С. К. Фомичев, М. А. Яременко // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1999. — № 1. — С. 3–12.*
2. *Автономная система мониторинга механических напряжений магистральных трубопроводов с использованием возможностей GSM связи / С. К. Фомичев, С. Н. Минаков, М. А. Яременко и др. // Там же. — 2008. — № 1. — С. 9–12.*
3. *Определение силовых воздействий на трубопровод по анализу эпюр распределения продольных напряжений / С. К. Фомичев, С. Н. Минаков, С. В. Михалко и др. // Там же. — 2009. — № 2. — С. 11–14.*

*Поступила в редакцию
19.12.2011*

NDT
11-я Международная выставка и конференция
**НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ И ТЕХНИЧЕСКАЯ
ДИАГНОСТИКА В ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

MERATEK
13-я Международная выставка
**ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ
И ПРОМЫШЛЕННАЯ АВТОМАТИЗАЦИЯ**

28.02 – 01.03.2012
МОСКВА, СК ОЛИМПИЙСКИЙ

Организаторы:

тел.: +7 (812) 380 6002/00, ndt@primexpo.ru, mera@primexpo.ru

ДНИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ 2012
50 лет Болгарского Общества
Неразрушающего Контроля
11 — 15 июня 2012 г.
СОЗОПОЛЬ

Организаторы
ННТД по дефектоскопии, Институт механики, Технический университет - Варна,
Петербургский энергетический институт повышения квалификации НТС по машиностроению

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ
факс: (+359 2) 870 74 98, (+359 2) 979 71 20
e-mail: nntdd@abv.bg, nntdd@imbm.bas.bg

ДО ПИТАННЯ ГАРМОНІЗАЦІЇ СТАНДАРТУ ДСТУ-Н Б А.3.1-15:2010.

Настанова з ультразвукового контролю зварних з'єднань металевих конструкцій. Частина 1

Ю. В. РАДИШ, канд. фіз.-мат. наук, **В. О. ЦЕЧАЛЬ**, інж., **А. С. КІРЄЄВ**, канд. техн. наук (ТК «Спецмонтаж»),
І. Я. ШЕВЧЕНКО, канд. техн. наук (ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України), **В. Г. РАДЬКО**, канд. техн. наук (УкрНДІНК)

Вирішена одна з головних проблем гармонізації уніфікованих методів ультразвукового контролю, які регламентуються європейськими стандартами (ДСТУ EN 583, ДСТУ EN 1712, ДСТУ EN 1713, ДСТУ EN 1714, BS EN 25817, ISO 5817), із національними нормами оцінки якості зварних з'єднань металоконструкцій, установлені СНиП III-18-75, СНиП 3.03.01-87 та іншими нормативними документами. Зварні з'єднання сталевих конструкцій розділяються на три категорії в залежності від типу, умов експлуатації та рівня їх відповідальності. Ці категорії визначають, відповідно, три рівня якості ультразвукового контролю, який виконується при виготовленні, монтажі, експлуатації та ремонті сталевих конструкцій. Дефекти зварних з'єднань високого, середнього та низького рівня якості приводяться у відповідність з дефектами зварних з'єднань рівнів якості B, C і D, що визначаються європейськими стандартами BS EN 25817. Таким чином досягається гармонізація цього стандарту з європейськими нормами на виконання ультразвукового контролю.

One of the main problems of harmonizing unified methods of ultrasonic testing, which are regulated by European standards (DSTU EN 583, DSTU EN 1712, DSTU EN 1713, DSTU EN 1714, BS EN 25817, ISO 5817) with national norms for assessment of quality of welded joints of metal structures specified by SNiP III-18D75, SNiP 3.03.01D87 and other normative documents, has been solved. Welded joints of steel structures are divided into three categories, depending on the type, service conditions and level of their importance. These categories determine three levels of quality of ultrasonic testing, which is applied in fabrication, mounting, service and repair of steel structures. Defects of welded joints of high, medium and low quality level are coordinated with the defects of welded joints of quality levels B, C and D that are determined by European standards BS EN 25817. This way harmonizing of this standard with the European norms for ultrasonic testing performance is achieved.

Стандартом ДСТУ-Н Б А.3.1-15:2010 встановлено вимоги на методи, засоби і норми виконання ультразвукового (УЗ) контролю різних типів зварних з'єднань металоконструкцій з урахуванням тих європейських стандартів, які діють на Україні в якості національних. Стандарт містить 11 розділів та 4 додатки. В основних розділах викладені загальні положення щодо контролю, а також вимоги до технічних засобів контролю, персоналу, техніки безпеки, до підготовки і виконання контролю та до оформлення результатів контролю. В додатках йдеться про визначення координат центру несучільності за параметрами луна-сигналу та про вимоги до виконання УЗ контролю різних типів зварних з'єднань і до змісту протоколу УЗ контролю, а також наводиться бібліографія. Нижче наведені деякі викладки зі стандарту, які стосуються його змісту.

Загальні положення щодо контролю. Зварні з'єднання за придатністю до виконання УЗ контролю поділяються на чотири групи (табл. 1).

Група придатності до контролю зварного з'єднання повинна бути зазначена в звітних документах за результатами УЗ контролю.

Примітка. УЗ контроль зварних з'єднань, що належать до III та IV груп придатності до контролю, даним стандартом не передбачається.

Стандарт встановлює норми оцінки та способи виконання ручного УЗ контролю зварних з'єднань сталевих конструкцій в залежності від типу, умов експлуатації та міри відповідальності зварного з'єднання в конструкції згідно з табл. 2.

Примітка. УЗ контроль зварних з'єднань 3-го (низького) рівня, що віднесені до 3-ї категорії, даним стандартом не передбачаються.

УЗ контроль зварних з'єднань повинен виконуватись після усунення усіх невідповідностей вимогам нормативних документів, що виявлені при заключному візуальному та вимірювальному контролі.

Вимоги до визначення параметрів індикації. При контролі зварних з'єднань повинні бути визначені чисельні значення параметрів індикації всіх несучільностей, амплітуди луна-сигналів від яких перевищують рівень реєстрації. Наявність несучільностей у зварному з'єднанні встановлюється при поздовжньому *L*-скануванні та нормального *N*-скануванні. При *L*-скануванні виявляються та параметризуються поздовжні індикації, у яких кут між напрямком умовної протяжності та поздовжньою віссю зварного шва знаходиться у межах $0 \pm 15^\circ$. При *N*-скануванні виявляються та параметризуються всі індикації, незалежно від напрямку умовної протяжності.

Таблиця 1. Групи придатності до контролю зварних з'єднань

Група придатності до контролю зварного з'єднання	Характеристика зварного з'єднання в групі за придатністю до виконання УЗ контролю
I	Кожна точка зони контролю зварного з'єднання повинна бути доступна для прозвучування центральним променем не менше, ніж у двох напрямках
II	Кожна точка зони контролю зварного з'єднання повинна бути доступна для прозвучування центральним променем хоча б в одному напрямку
III	Зона контролю зварного з'єднання включає зону, недоступну для прозвучування центральним променем у будь-якому напрямку за умови, що в проекції на площину, яка нормальна до центрального променя, площа зони, що недоступна для прозвучування, не перевищує 20 % площі зони контролю
IV	Зона контролю зварного з'єднання включає зону, недоступну для прозвучування центральним променем у будь-якому напрямку, а умова приналежності зварного з'єднання в третій групі придатності до контролю не виконується

Кут орієнтації перетворювача при *L*-скануванні повинен знаходитися в діапазоні $0 \pm 15^\circ$. Траєкторії точки вводу на поверхні сканування та траєкторія центрального променя в нормальній поздовжній площині перетворювача з кутом орієнтації θ наведені на рис. 1. Параметри цих траєкторій повинні відповідати вказаним на рисунку.

Еквівалентна площа несучільності повинна вимірюватися за найбільшим значенням амплітуди луна-сигналу від несучільності.

Параметри луна-сигналу від несучільності з найбільшою амплітудою вимірюються по *A*-скану на екрані дефектоскопу. При цьому координати

X, *Y* та *Z* центру несучільності повинні розраховуватися по вимірним параметрам луна-сигналу згідно додатку А.

Умовні розміри несучільності повинні визначатися по протяжності зони індикації та по величині інтервалу відстаней у зоні індикації.

Протяжність орієнтованої зони індикації повинна вимірюватися по відстані на поверхні сканування між крайніми положеннями перетворювача, які встановлюються при спрямованому скануванні з траєкторією переміщення точки вводу згідно рис. 2, *a*. В крайніх положеннях перетворювача огинаюча для всіх огинаючих амплітуд лу-

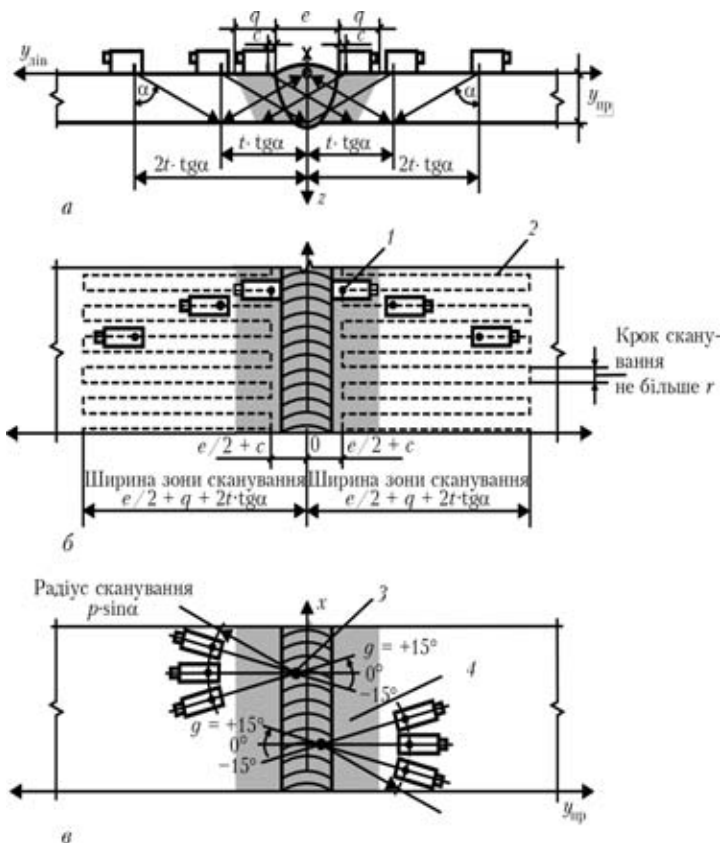


Рис. 1. Схеми *L*-сканування: *a* — траєкторія центрального променя при скануванні прямим та однократно відбитим променем; *б* — поперечно-поздовжня траєкторія точки вводу при спрямованому скануванні; *в* — кругова траєкторія точки вводу при неспрямованому скануванні; 1 — точка вводу перетворювача на поверхні сканування; 2 — траєкторія переміщення точки вводу; 3 — проекція центру несучільності на поверхні сканування; 4 — зона контролю зварного з'єднання

Таблиця 2. Відповідність між групами відповідальності та рівнями контролю зварних з'єднань

Категорія зварного з'єднання	Група відповідальності зварного з'єднання	Характеристика зварного з'єднання в групі за типом, умовами експлуатації та мірою відповідальності в конструкції	Рівень контролю зварного з'єднання
1	1	Поперечні стикові зварні з'єднання, що сприймають розтяжні напруження $\sigma_p \geq 0,85 R_y$ (в розтягнених поясах та стінках балок, елементах ферм тощо)	1 — високий
	2	Таврові, кутові, напускові зварні з'єднання, які працюють на відрив при розтяжних напруженнях $\sigma_p \geq 0,85 R_y$ в елементі, що кріпиться, та при напруженнях зрізу $\tau_{\text{вш}} \geq 0,85 R_{\text{вф}}$ у швах	
	3	Зварні з'єднання в конструкціях або їх елементах, що відносяться до першої групи*, а також в конструкціях другої групи* — в кліматичних умовах будівництва до мінус 40 °С (окрім випадків, що віднесені до 7–12 груп відповідальності)	
2	4	Поперечні стикові зварні з'єднання, що сприймають розтяжні напруження $0,4R_y \leq \sigma_p < 0,85 R_y$, а також таврові, кутові, напускові зварні з'єднання, які працюють на відрив при розтяжних напруженнях $\sigma_p < 0,85 R_y$ в елементі, що кріпиться, та при напруженнях зрізу $\tau_{\text{вш}} < 0,85 R_{\text{вф}}$ у швах (окрім випадків, що віднесені до 3 групи відповідальності)	2 — середній
	5	Розрахункові таврові, кутові та напускові зварні з'єднання, що сприймають напруження зрізу $\tau_{\text{вш}} \geq 0,75 R_{\text{вф}}$ та з'єднують основні елементи конструкції другої та третьої груп* (окрім випадків, що віднесені до 2, 3 груп відповідальності)	
	6	Поздовжні стикові зварні з'єднання, що сприймають напруження розтягнення або зсуву $0,4R \leq \sigma < 0,85 R$	
	7	Поздовжні (зв'язкові) таврові, кутові та напускові зварні з'єднання в основних елементах конструкцій другої та третьої груп*, що сприймають напруження розтягнення (поясні зварні з'єднання елементів складеного перетину, зварні з'єднання в розтягнених елементах ферм та інше)	
	8	Стикові, таврові, кутові та напускові зварні з'єднання, що кріплять до розтягнених зон основних елементів конструкції вузлові фасонки, фасонки з'єднань, упори та інше	
3	9	Поперечні стикові зварні з'єднання, що сприймають напруження стиску	3 — низький
	10	Поздовжні стикові зварні з'єднання та зв'язуючі таврові, кутові та напускові зварні з'єднання в стиснутих елементах конструкції	
	11	Стикові, таврові, кутові та напускові зварні з'єднання, що кріплять фасонки до стиснутих елементів конструкції	
	12	Стикові, таврові, кутові та напускові зварні з'єднання в допоміжних елементах конструкції (конструкціях четвертої групи*)	

* Умовні позначення за класифікацією ДБН В.2.6–2010: σ_p — напруження розтягнення (нормальні) металу шва; R_y — розрахунковий опір сталі розтягненню, стиску та вигину по межі плинності; $\tau_{\text{вш}}$ — напруження зрізу (дотичне) металу кутового шва; $R_{\text{вф}}$ — розрахунковий опір кутового шва в зрізі (умовному) по металу шва; σ — напруження розтягнення (нормальне) або зсуву (дотичне) металу шва; R — розрахунковий опір металу шва

на-сигналів від несучільності при переміщенні точки вводу в зоні індикації вздовж поздовжньої осі перетворювача приймає значення, що дорівнюють рівню оцінки.

Протяжність неорієнтованої зони індикації повинна вимірюватися по найбільшій відстані на поверхні сканування між різними положеннями точки вводу на межі зони індикації. Найбільша відстань між різними діаметральними положеннями точки вводу на межі зони індикації визначається при скануванні з траєкторією переміщення точки вводу згідно рис. 3, а. У діаметрально протилежних положеннях точки вводу на межі зони індикації огинаюча амплітуд луна-сигналів від несучільності при переміщенні точки вводу в зоні індикації вздовж діаметрального напрямку

приймає значення, що дорівнюють рівню оцінки. Позначається найбільша з вимірних відстаней між різними діаметральними положеннями точки вводу на межі зони індикації.

Величина інтервалу відстаней в зоні індикації повинна вимірюватися як різниця між найбільшою та найменшою відстанями, що відлічуються по осі абсцис А-скану дефектоскопа. При цих відстанях огинаюча для всіх огинаючих амплітуд луна-сигналів від несучільності на різних ділянках траєкторії переміщення точки вводу в зоні індикації приймає значення, що дорівнює рівню оцінки згідно рис. 2, а і 3, а.

У разі складності або неможливості вимірювань умовних розмірів несучільності через умови контролю допускається визначення умовних

розмірів несущільності як параметрів поздовжньої індикації у відповідності з ГОСТ 14782 згідно рис. 2, б та 3, б.

Вимоги до оцінки якості. Якість зварного з'єднання повинна оцінюватися за параметрами усіх виявлених під час контролю індикацій, еквівалентна площа яких перевищує рівень реєстрації.

Рівень реєстрації встановлюється в залежності від умовної протяжності несущільності згідно табл. 3 та рис. 4 для зварних з'єднань першої категорії та згідно табл. 4 та рис. 5 для з'єднань другої категорії.

Норми оцінки якості встановлюються щодо параметрів окремої індикації, що реєструється.

Дефектами у зварному з'єднанні першої категорії є окремі індикації або сукупність індикацій,

параметри яких не відповідають хоча б одній з вимог, наведених нижче:

– еквівалентна площа несущільності не повинна перевищувати рівень приймання, який встановлюється в залежності від умовної протяжності несущільності згідно табл. 4 та рис. 5;

– умовна висота несущільності не повинна перевищувати 20 % від найменшої номінальної товщини основного матеріалу деталей, що з'єднані зварюванням;

– сума умовних протяжностей несущільностей усіх поздовжніх індикацій на будь-якій контрольній ділянці зварного з'єднання завдовжки в 10 найменших номінальних товщин основного матеріалу деталей, що з'єднані зварюванням, не повинна перевищувати 20 % довжини контрольної ділянки.

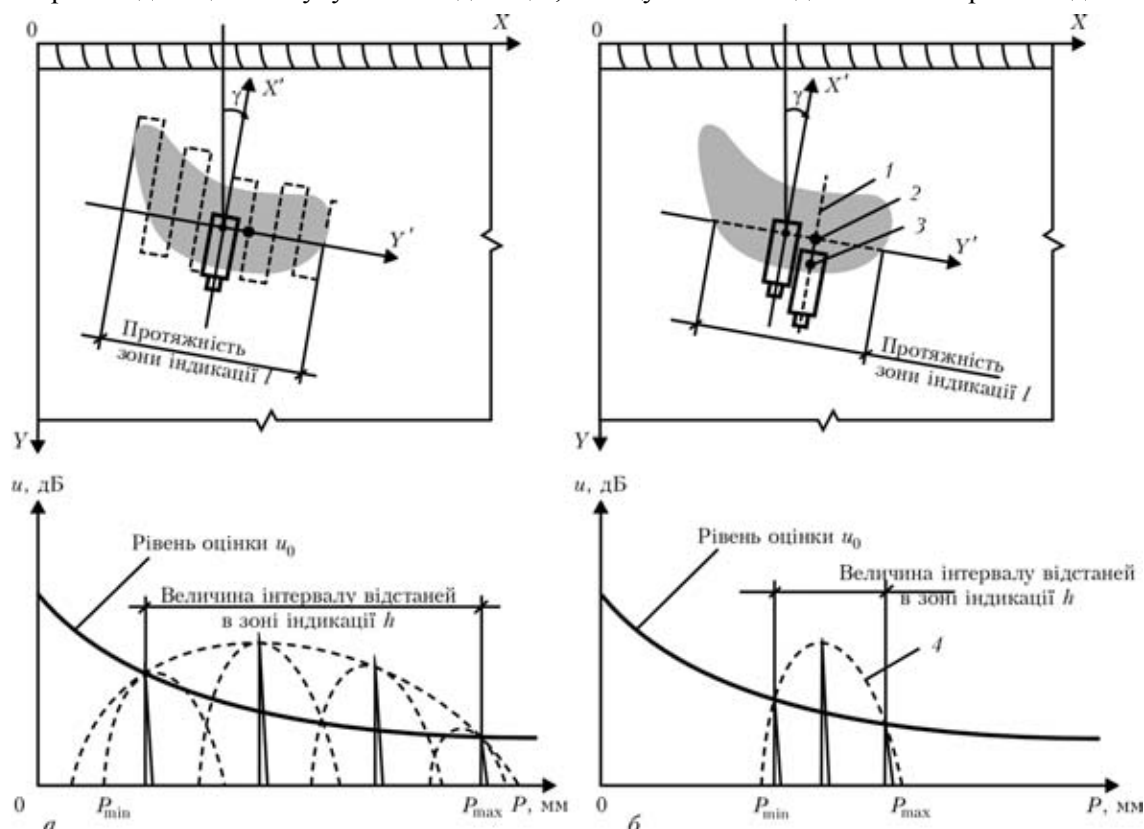


Рис. 2. Визначення умовних розмірів несущільності при орієнтованій зоні індикації: а, б — точне та приблизне визначення відповідно (X, Y — поздовжня та поперечна осі зварного з'єднання; X', Y' — поздовжня та поперечна осі перетворювача; γ — кут орієнтації зони індикації, кут орієнтації перетворювача при спрямованому скануванні; 1 — траєкторія переміщення точки вводу при спрямованому скануванні; 2 — зона індикації несущільності та її центр; 3 — точка вводу на поверхні сканування; 4 — обгинаючі амплітуди луна-сигналу)

Таблиця 3. Таблична форма залежності рівнів приймання, реєстрації та оцінки від умовної протяжності окремої несущільності для різних товщин основного матеріалу зварного з'єднання першої категорії, мм

Товщина основного матеріалу, мм	8 ≤ t < 15		15 ≤ t ≤ 100		
	0 ≤ L < t	t ≤ L	0 ≤ L < 0,5t	0,5t ≤ L < t	t ≤ L
Умовна протяжність несущільності, мм					
Рівень приймання, дБ	u _п = +6	u _п = 0	u _п = +10	u _п = +4	u _п = 0
Рівень реєстрації, дБ	u _р = 0		u _р = 0		
Рівень оцінки, дБ	u ₀ = -4				

Примітка. Опорний рівень дорівнює 0

Дефектами у зварному з'єднанні другої категорії є окремі індикації або сукупність індикацій, параметри яких не відповідають хоча б одній з наведених нижче вимог:

Таблиця 4. Таблична форма залежності рівнів приймання, реєстрації та оцінки від умовної протяжності окремої несущальності для різних товщин основного матеріалу зварного з'єднання другої категорії

Товщина основного матеріалу, мм	$8 \leq t < 15$		$15 \leq t \leq 100$		
	$0 \leq L < t$	$t \leq L$	$0 \leq L < 0,5t$	$0,5t \leq L < t$	$t \leq L$
Умовна протяжність несущальності, мм					
Рівень приймання, дБ	$u_n = +6$	$u_n = 0$	$u_n = +10$	$u_n = +4$	$u_n = 0$
Рівень реєстрації, дБ	$u_p = +4$	$u_p = 0$	$u_p = +4$		$u_p = 0$
Рівень оцінки, дБ	$u_0 = -4$				

Примітка. Опорний рівень дорівнює 0

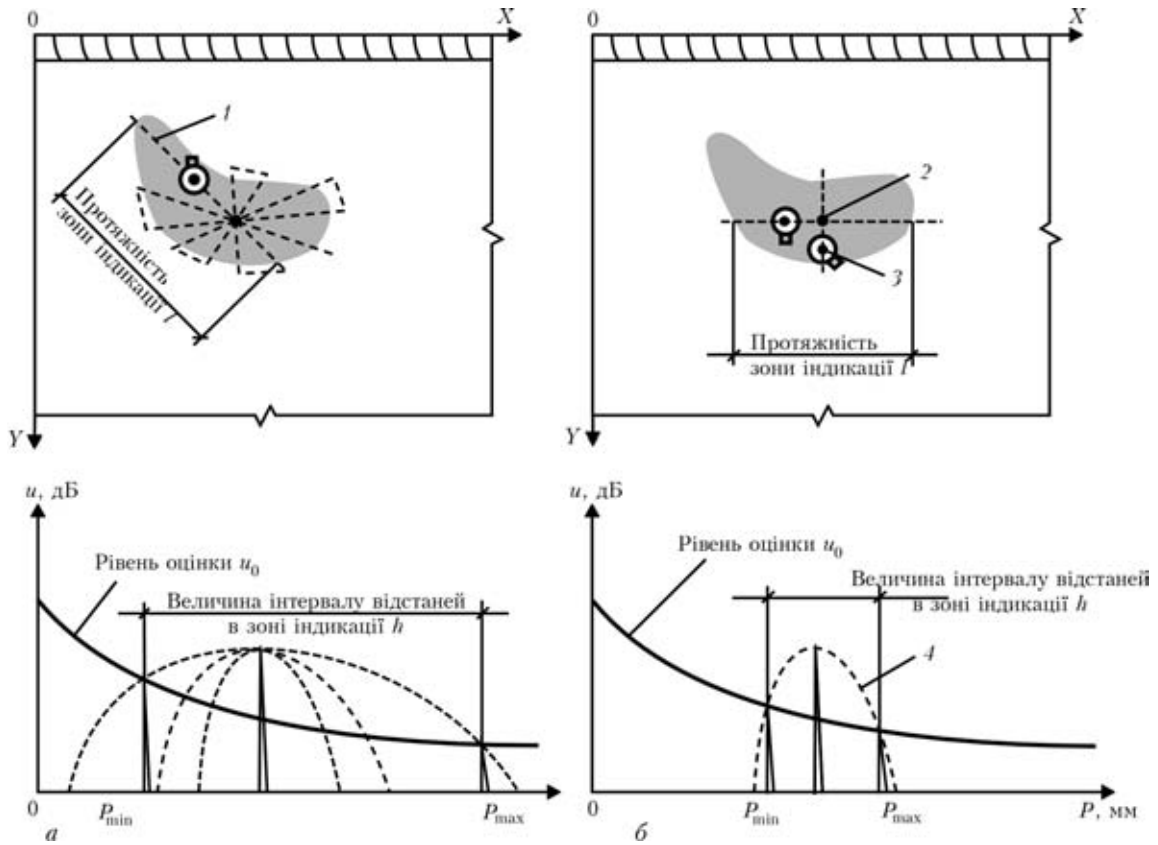


Рис. 3. Визначення умовних розмірів несущальності при неорієнтованій зоні індикації: а, б — точне та приблизне визначення відповідно (позначення ті самі, що і на рис. 2)

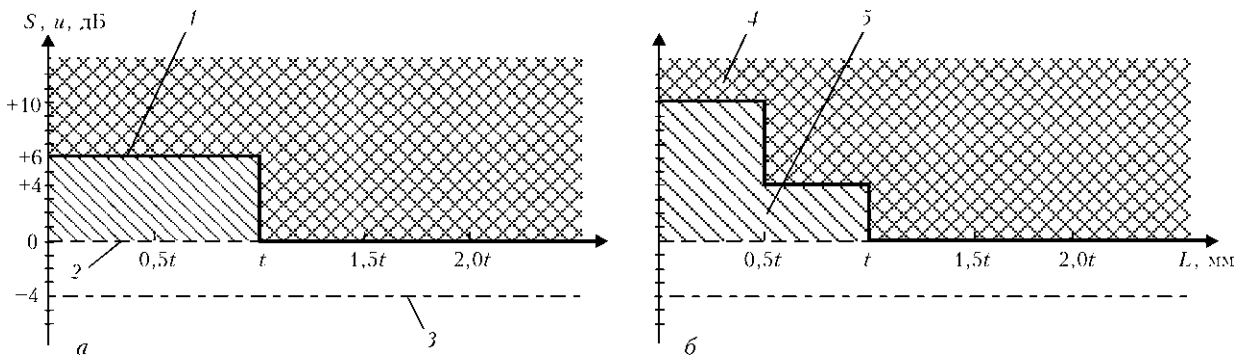


Рис. 4. Графічна форма залежності рівнів приймання, реєстрації та оцінки від умовної протяжності окремої несущальності при різних товщинах основного матеріалу зварного з'єднання першої категорії, мм: а — $8 \leq t < 15$; б — $15 \leq t \leq 100$ (1 — рівень приймання U_n , дБ; 2 — рівень реєстрації U_p , дБ; 3 — рівень оцінки U_0 , дБ; 4 — область недопустимих параметрів несущальності; 5 — область параметрів несущальності, що реєструється)

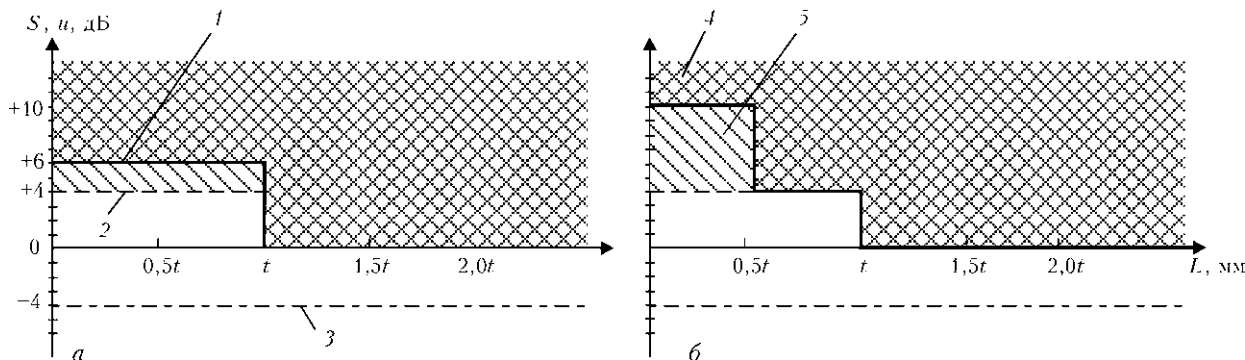


Рис. 5. Графічна форма залежності рівнів приймання, ресстрації та оцінки від умовної протяжності окремої несущільності при різних товщинах основного матеріалу зварного з'єднання другої категорії, мм: а — $8 \leq t < 15$; б — $15 \leq t \leq 100$ (позначення ті самі, що і на рис. 2)

- еквівалентна площа несущільності не повинна перевищувати рівня приймання, який встановлюється в залежності від умовної протяжності несущільності, згідно табл. 4 та рис. 5;
- умовна висота несущільності не повинна перевищувати 40 % від найменшої номінальної товщини основного матеріалу деталей, що з'єднані зварюванням;
- сума умовних протяжностей несущільності усіх поздовжніх індикацій на будь-якій конт-

рольній ділянці зварного з'єднання протяжністю в 10 найменших номінальних товщин основного матеріалу деталей, що з'єднані зварюванням, не повинна перевищувати 20 % протяжності контрольної ділянки.

Вимоги до виконання УЗ контролю різних типів зварних з'єднань будуть представлені в наступному випуску.

Надійшла до редакції
20.09.2011

ПОРТАТИВНЫЕ НАМАГНИЧИВАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ ИЗ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ ДЛЯ МАГНИТНЫХ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ «МАГЭКС»

Намагничивающие устройства «МАГЭКС», разработанные Институтом электросварки им. Е.О.Патона НАН Украины, предназначены для намагничивания изделий при магнитопорошковом контроле конструкций из ферромагнитных материалов и их сварных соединений, а также для получения поля подмагничивания при феррозондовом контроле. Портативные устройства «МАГЭКС» просты, надежны, удобны в полевых условиях, при проведении высотных монтажных работ, при контроле качества внутренней поверхности емкостей, трубопроводов и т.п., особенно в случае повышенных требований электро- и взрывобезопасности.

Область применения намагничивающих устройств «МАГЭКС»: машиностроительный комплекс, судостроение, авиационный, железнодорожный и автомобильный транспорт, предприятия химической, газовой, нефтеперерабатывающей промышленности и энергетики.

Комплекты «МАГЭКС» обеспечивают высокую выявляемость поверхностных и подповерхностных (на глубине до 2 мм) несплошностей всех видов (уровень чувствительности А по ГОСТ 21105–87). Выпускаются в двух модификациях.

«МАГЭКС-1П» предназначен для контроля качества деталей сложной формы, например, крюков подъемных кранов, угловых сварных соединений и труднодоступных зон конструкций. Выполнено в виде двух цилиндрических разнополюсных магнитных полюсов, соединенных гибким магнитопроводом.

«МАГЭКС-2П» предназначен для контроля качества протяженных сварных соединений листовых конструкций, резервуаров, трубопроводов и пр. Намагничивающее устройство передвижное, конструктивно выполнено в виде разнополюсной колесной пары с общей ферромагнитной осью, что значительно увеличивает производительность контроля.

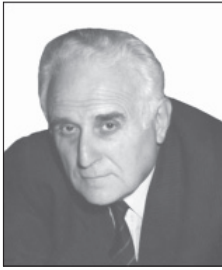
При несколько кратном прокатывании по поверхности детали появляется дополнительная переменная тангенциальная составляющая магнитного поля рассеяния, что повышает выявляемость дефектов.

ИЭС им. Е.О.Патона НАН Украины
e-mail: office@paton.kiev.ua





И. К. ПОХОДНЕ — 85



Игорь Константинович Походня — известный украинский ученый в области металлургии и технологии металлов, материаловедения, электросварки, видный общественный деятель, крупный организатор науки, академик НАН Украины, лауреат Государственных премий СССР и Государственной премии Украины в области науки и техники, Премии Совета Министров СССР, Премии им. Е. О. Патона и Премии им. Н. Н. Доброхотова НАН Украины, профессор, доктор технических наук, заслуженный деятель науки и техники Украины.

И. К. Походня родился 24 января 1927 г. в Москве. В 1930–1941 гг. жил и учился в Минске. Во время Великой Отечественной войны экстерном окончил среднюю школу и в 1945 г. поступил в Киевский политехнический институт. После его окончания работал начальником бюро сварки Донецкого машиностроительного завода им. 15-летия Ленинского комсомола. В 1952 г. стал аспирантом Института электросварки им. Е. О. Патона. С этих пор вся жизнь и деятельность И. К. Походни неразрывно связаны с Институтом электросварки им. Е. О. Патона и Национальной академией наук Украины.

В 1955 г. И. К. Походня успешно защитил диссертацию на соискание научной степени кандидата технических наук, в 1968 г. — доктора технических наук. В 1972 г. он избирается членом-корреспондентом, а в 1978 г. — действительным членом АН УССР (ныне НАН Украины).

Фундаментальные исследования закономерностей кинетики плавления и переноса электродного металла, распределения температуры в сварочной ванне и каплях электродного металла, процессов абсорбции и десорбции газов, взаимодействия в системе «состав–структура–свойства» применительно к металлу сварных швов внесли большой вклад в теорию сварочных процессов и получили мировое признание. С его участием были созданы промышленные технологии по изготовлению прогрессивных сварочных материалов, построены мощные цеха по производству покрытых электродов и порошковых проволок, что позволило обеспечивать потребности предприятий Украины и ближнего зарубежья в этих материалах при изготовлении сварных металлоконструкций из углеродистых и низколегированных сталей. Широко известны работы И. К. Походни и коллектива сотрудников, который он возглавляет, в области улучшения санитарно-гигиенических харак-

теристик сварочных материалов, развития современных представлений о механизме влияния водорода на охрупчивание металла швов, математическое моделирование металлургических процессов дуговой сварки.

Научный вклад И. К. Походни в развитие отечественной промышленности в целом и процессов изготовления сварных металлоконструкций в частности был отмечен двумя Государственными премиями СССР в области науки и техники (1971, 1978), Премией Совета Министров СССР (1983), Государственной премией Украины в области науки и техники (1999).

Приоритет разработок, выполненных под руководством И. К. Походни, защищен авторскими свидетельствами и патентами СССР, Болгарии и Чехии, США, ФРГ, Великобритании, Франции, Италии, Австрии, Швейцарии, Венгрии и других стран. Отечественные технологические линии, оборудование, «ноу-хау» поставлены фирмам США, ФРГ, Франции, Японии, ЧССР, ВНР, НРБ, Аргентины, Китая.

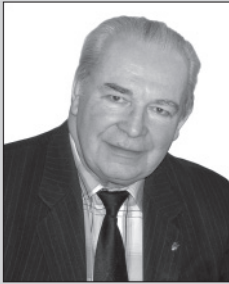
И. К. Походня — автор более 900 научных работ, в том числе 28 монографий, 8 из которых изданы в США, Великобритании, Китае, Чехии, 118 изобретений, 158 зарубежных патентов, 6 патентов Украины.

Под его научным руководством подготовлено 39 кандидатов наук, шестеро из которых стали докторами наук. За активную работу по подготовке научных кадров ему в 1970 г. присвоено звание профессора. За плодотворную научную и практическую деятельность, вклад в развитие народного хозяйства И. К. Походня награжден орденами СССР, Украины, Болгарии и Чехословакии.

На протяжении 36 лет И. К. Походня проводит плодотворную научно-организационную работу в Национальной академии наук Украины на посту главного ученого секретаря, вице-президента НАН Украины. С 1988 г. И. К. Походня многократно избирается академиком-секретарем Отделения физико-технических проблем материаловедения НАН Украины. На этом ответственном посту он много внимания уделяет организации новых направлений исследований в области материаловедения, координации работ, подготовке кадров научных сотрудников и организаторов науки, работе с научной молодежью, укреплению материальной и технической базы институтов.

Сердечно поздравляем юбиляра, желаем новых научных свершений, крепкого здоровья, благополучия.

Редколлегия и редакция журнала «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»



М. Г. БІЛОМУ— 75

Виповнилось 75 років старшому науковому співробітнику Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, заступнику завідуючого відділом, заступнику Центра сертифікації при Українському товаристві неруйнівного контролю, члену Правління Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики, кандидату технічних наук **Миколі Григоровичу Білому**.

Багато сил, енергії і знань Микола Григорович віддав Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ, розпочавши свою трудову діяльність в ньому в 1966 р. після закінчення Київського політехнічного інституту. В 1982 р. — захистив дисертацію, в основу якої лягли дослідження та розробка трьохфазних симетричних трансформаторів, регульованих підмагнічуванням – перспективних джерел електроживлення для зварювання.

В кінці 1970-х років Білий М. Г. став провідним фахівцем відділу неруйнівного контролю якості зварних металоконструкцій, очоливши лабораторію радіаційного контролю зварних швів.

Ним було внесено значний вклад у створення та впровадження у практику промислової радіографії детекторів з малим вмістом срібла, високочутливих рентгентелевізійних систем з комп'ютерною обробкою сигналів, систем підвищення контрасту та архівування рентгенографічних знімків, цифрових технологій в радіаційному контролі зварних з'єднань тощо.

За багато років плідної наукової праці Миколою Григоровичем було опубліковано більше 200 статей в різних науково-технічних журналах, одержано біля 60 авторських свідоцтв та патентів, підготовлено кілька державних стандартів та інших нормативних документів.

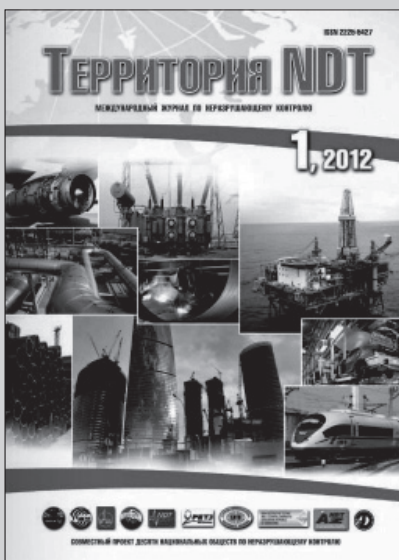
Багато часу віддано громадській роботі в Українському товаристві неруйнівного контролю та технічної діагностики, членом правління якого Білий М. Г. являється, та діяльності в Центрі сертифікації персоналу з неруйнівного контролю і в журналі «Техническая диагностика и неразрушающий контроль».

Бажаємо Вам, шановний Миколо Григоровичу, довгих років творчого, щасливого, цікавого життя, міцного здоров'я, оптимізму та впевненості, затишку в оселі та душевного спокою, добробуту та благополуччя, доброго гумору.

Ми віримо в Ваші сили, в Вашу мудрість, віримо, що багато років матимемо насолоду співпрацювати з Вами!

Правління Українського товариства НК ТД

Представляем первый международный журнал по контролю и диагностике на русском языке «Территория NDT»



После проведения в Москве 10-й Европейской конференции по неразрушающему контролю (НК) и выставки средств НК Российское общество по неразрушающему контролю и технической диагностике (РОНКТД) совместно с национальными обществами НК Украины, Беларуси, Казахстана, Азербайджана, Грузии, Латвии, Молдавии и Узбекистана решили объединить свои усилия по созданию единого информационного пространства и выпустить новый международный журнал «Территория NDT» для специалистов НК, говорящих на русском языке.

Председатель УО НКТД проф. Троицкий В.А. является заместителем главного редактора нового журнала. В состав редакционного совета журнала вошли руководители десяти национальных обществ по НК.

Журнал выходит 4 раза в год тиражом 7...10 тыс. экземпляров и является бесплатным для читателей, финансирование журнала организовано за счет спонсоров и рекламы.

*Подробная информация размещена на сайте журнала:
www.tndt.idspektr.ru*



Национальная
Академия
наук Украины

Портативная рентгентелевизионная система

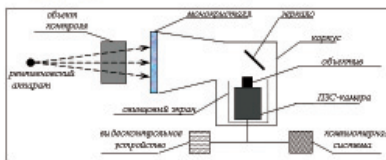
Институтом электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины совместно с другими организациями создана портативная рентгентелевизионная система (РТ) для выполнения рентгеноскопического контроля в полевых условиях с цифровой обработкой результатов.

Здесь отсутствуют промежуточные носители информации (рентгеновские пленки, полупроводниковые пластины), средства химической обработки.

Система включает портативный R-аппарат, портативный пульт управления, монокристаллический экран и ноутбук, которые располагаются в двух небольших кейсах.

Основные технические данные: $U = 160 \text{ кВ}$, $I = 1,5 \text{ мА}$, масса $12 \pm 18 \text{ кг}$.

Структурная схема портативной РТ



Портативная РТ система



а - R-аппарат,
б - детектирующее устройство и ноутбук

Установка аппаратуры на объекте



Основные преимущества созданной РТ:

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

Данная рентгентелевизионная система обеспечивает чувствительность радиационного контроля порядка 1,5-2,0 %, что соответствует чувствительности пленочных систем.

Ее использование снижает почти в 10 раз стоимость рентгеновского контроля в полевых условиях.

При этом запоминается и архивируется только информация о зонах с дефектами, подлежащими ремонту, печатается заключение о виде и размерах обнаруженных дефектов.



Контакты:

Тел.: (044) 200-46-66, 200-80-57

Факс: (044) 205-31-66

E-mail: ndt@paton.kiev.ua

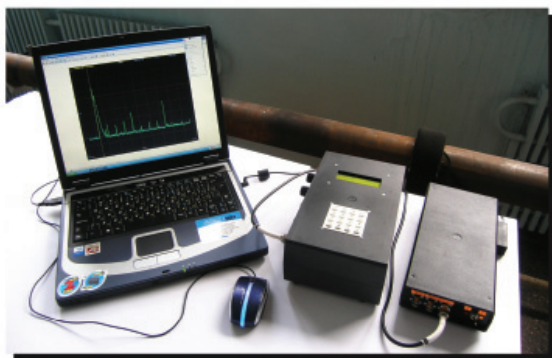


Новая система ультразвукового контроля для определения коррозионного износа трубопроводов Универсал – 1П

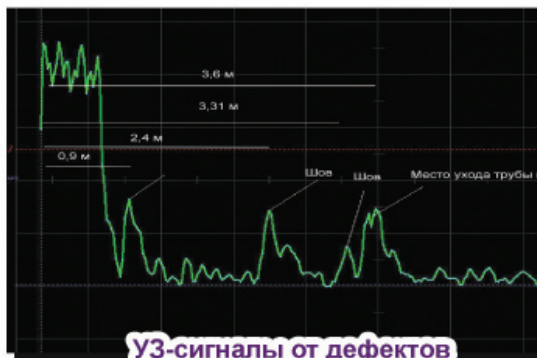
Ведущие организации из 12 европейских стран, включая Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики, выполняли проект

«Мониторинг состояния объектов посредством дальнедействующего ультразвука» (LRUCM), позволяющий оценивать состояние протяженных объектов без сканирования поверхности.

Основным достижением данного проекта является разработка в Украине системы ультразвукового контроля, которая позволяет производить оценку технического состояния протяженных объектов с одной установки акустической антенны в труднодоступных местах и в полевых условиях.



Антенна и блоки системы УЗ-контроля



УЗ-сигналы от дефектов и сварных швов трубопровода

Система основана на использовании низкочастотных направленных волн, способных распространяться на большие расстояния от места закрепления антенны, что позволяет по эхо-сигналам обнаруживать коррозионные поражения и другие дефекты потери металла протяженных объектов (труб, свай и т.д.) на расстоянии ~100 м.

При этом у трубопроводов выявляются коррозионные язвы, глубина которых составляет не менее 10 % от толщины стенки трубы.

Установка системы Универсал-1П на трубопроводе



Технические характеристики ультразвуковой системы:

- Диаметр контролируемых труб - 50... 300 мм;
- Дальность контроля ~100 м (зависит от покрытия и состояния трубы);
- Разрешающая способность ~30 см;
- Время установки акустической антенны – 15-20 мин;
- Питание системы - автономное.

Контакты:

Тел.: (044) 200-46-66, Факс: (044) 205-31-66

E-mail: ndt@paton.kiev.ua



КАЛЕНДАРЬ КОНФЕРЕНЦИЙ И ВЫСТАВОК по НК в 2012 г.

Дата	Место проведения	Мероприятие	Организатор (контакты)
20 – 25.02	с. Славское, Львовская обл., Украина	17-я Международная научно-техническая конференция «ЛЕОТЕСТ-2012»	Тел./факс: +38(044) 573 30 40 e-mail: office@conference.kiev.ua
28.02 – 01.03	Москва, Россия	11-я Международная выставка и конференция «Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности»	«ПримЭкспо» тел.: (812)380 60 02 e-mail: ndt@primexpo.ru
10 – 13.04	Минск, Беларусь	12-я Международная специализированная выставка «Сварка и Резка- 2012»	ЗАО «Минск Экспо» тел./факс: +37517 226 98 58 e-mail: julia@minskexpo.com
17 – 19.04	Киев, Украина	Промышленная выставка «ПатонЭкспо 2012»	ВЦ «КиевЭкспоПлаза» www.weldexpo.com.ua
17 – 19.04	Москва, Россия	4-я Специализированная выставка научного, измерительного и испытательного оборудования и систем «Экспо Контроль 2012»	www.gual-expo.ru
04 – 06.06	Львов, Украина	XI Международная конференция и выставка «Проблемы коррозии и защита от коррозии конструкционных материалов «Коррозия-2012»	Физико-механический институт НАНУ им. Г. В. Карпенко
11 – 15.06	Созополь, Болгария	Дни неразрушающего контроля-2012	Технический ун-т – Варна e-mail: nntdd@abv.bg, nntdd@imbm.bas.bg www.bgsndt.org, www.ndtbgcert.org
29.05 – 01.06	пос. Качивели, Крым, Украина	VI Международная конференция «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах»	Оргкомитет: ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины тел./факс: 38044 200-82-77 e-mail: journal@paton.kiev.ua
Сентябрь	Санкт-Петербург	13-я специализированная выставка «Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности»	Тел.: (812) 320-96-76, 320-80-92 факс: (812) 320-8090 e-mail: ptcomp@restec.ru, autopr@restec.ru
24 – 28.09	Ялта, Крым, Украина	12-я Международная научно-практическая конференция «Качество. Стандартизация. Контроль: Теория и практика»	АТМ Украина тел./факс: +38044 430-85-00 e-mail: atm@ism.kiev.ua
01 – 05.10	Гурзуф, Крым, Украина	Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики	УИЦ «НАУКА. ТЕХНИКА. ТЕХНОЛОГИЯ» тел./факс: + 380(44) 573 30 40
18 – 21.10	Днепропетровск, Украина	Выставка «Сварка и сварочные технологии. Трубы. Производство труб»	Днепропетровск
23–26.10	Москва, Россия	Международная специализированная выставка «Weldex/Россварка 2012»	МVK тел.: +7(495) 935 81 00 факс: +7(495) 935 81 01

ПОДПИСКА — 2012

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», «Саммит», «Прессцентр», KSS, «Блицинформ», «Меркурий» (Украина) и «Роспечать», «Пресса России» (Россия).



Подписка на электронную версию журнала
«Техническая диагностика и неразрушающий контроль»
на сайте: <http://www.rucont.ru>.



По подписке доступны выпуски журнала, начиная с 2009 г. в формате *.pdf. Подписка возможна на отдельные выпуски и на весь архив, включающий все выпуски за 2009–2011 гг. Подписка доступна физическим и юридическим лицам.

РЕКЛАМА в журнале «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»

Реклама публикуется на обложках и внутренних вклейках следующих размеров

- Первая страница обложки (190×190 мм)
- Вторая, третья и четвертая страницы обложки (200×290 мм)
- Первая, вторая, третья, четвертая страницы внутренней обложки (200×290 мм)
- Вклейка А4 (200×290 мм)
- Разворот А3 (400×290 мм)
- 0,5 А4 (185×130 мм)
- 0,25 А4 (90×130 мм)

Технические требования к рекламным материалам

- Размер журнала после обрезки 200×290 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 (сварка и родственные технологии)
- Ответственность за содержание рекламных материалов несет рекламодатель

Контакты:

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

Подписано к печати 10.02.2012. Формат 60×84/8. Офсетная печать.
Усл. печ. л. 9,04. Усл.-отт. 9,89. Уч.-изд. л. 10,24 + 6 цв. вклеек.
Печать ООО «Фирма «Эссе».