

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА и НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

№ 2, 2003

Издается с января 1989 г.

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

Издатель: Международная ассоциация «Сварка»

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор
Б. Е. ПАТОН

А. Я. Недосека (зам. гл. ред.),
В. А. Троицкий (зам. гл. ред.),
З. А. Майдан (отв. секр.),
И. П. Белокур, Ю. К. Бондаренко,
В. Л. Венгринович, Э. Ф. Гарф,
А. А. Грузд, Ю. Б. Дробот,
Н. Н. Зацепин, В. И. Иванов,
О. М. Карпаш, В. В. Клюев,
Л. М. Лобанов, А. А. Лебедев,
В. К. Лебедев, Г. Г. Луценко,
Н. В. Новиков, Е. С. Перецевезев,
П. П. Прохоренко, В. П. Радько,
В. Н. Учанин, А. Ф. Улитко,
А. И. Степаненко,
В. А. Стрижало, А. Я. Тетерко,
Т. М. Швец, И. Я. Шевченко,
А. В. Шимановский

Адрес редакции:

03680, Украина, г. Киев-150,
ул. Боженко, 11
Институт электросварки
им. Е. О. Патона НАН Украины
Тел.: (38044) 261-58-81, 269-26-23
Факс: (38044) 268-04-86
E-mail: journal@paton.kiev.ua
http://www.nas.gov.ua/pwj

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

Электронная верстка:
А. И. Сулима, И. Р. Наумова,
Н. Н. Приймаченко,
И. В. Петушков

Свидетельство
о государственной регистрации
КВ 4787 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.

За содержание рекламных
материалов редакция журнала
ответственности несет.

Цена договорная.

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА

ЛЕБЕДЕВ А. А., НЕДОСЕКА С. А., МУЗЫКА Н. Р., ВОЛЧЕК Н. Л. Оценка состояния металла труб после длительной эксплуатации в системе магистральных газопроводов	3
АГАЕВ Н. Б. Газодинамическое диагностирование технологических режимов работы трубопроводных систем	9
БАРВИНКО Ю. П., ГОЛИНЬКО В. М. О предложениях по совершенствованию базы диагностики технического состояния резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов	12
НАГОРНЫЙ В. М., ДЯДЮРА К. А. Прогнозирование момента подладки технологической системы механической обработки при возможных отклонениях от допустимых значений размеров обрабатываемых деталей	16

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

БЕЗЛЮДЬКО Г. Я. Эксплуатационный контроль усталостного состояния и ресурса металлопродукции неразрушающим магнитным (коэрцитиметрическим) методом	20
ЛУЦЕНКО Г. Г. К вопросу о точности измерения эквивалентного диаметра дефекта при использовании АРД-диаграмм	27
ДАВЫДОВ Е. А., РАДЬКО В. П. Компьютеризированная технология НК для определения размеров несплошностей сварных соединений ответственных конструкций методами синтезированной фокусирующей апертуры	32
САПРЫКИН С. А., КОЛБИН И. Б., ВОЛКОВ Ю. А., ТОПЧИЙ М. М., ГОРБЕНКО В. Н. Влияние состояния внутренней поверхности изделий на возможность проведения ультразвукового контроля преобразователями, имеющими высокую частоту излучения	36
КОЗИН А. Н. Измерение толщины ультразвуковыми толщинометрами с А-разверткой	41
ГУСЕВ А. П., КОСОВЕЦ С. А. Магнитное поле двойных дефектов типа коррозионных раковин	45
СЛЮСЕНКО К. К. Мониторинг состояния электромоторов с помощью CMVA60 и CMVA55 Microlog	48

СЕРТИФИКАЦИЯ И КАЧЕСТВО

БОНДАРЕНКО Ю. К., ПОТАЛЬЕВСКИЙ А. Г., ЖДАНОВ С. Л., КОВАЛЬЧУК О. В. Обеспечение качества и безопасности при выполнении сварочно-монтажных работ и технического диагностирования	50
---	----

ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ

ШЕКЕРО А. Л. 8-я Международная научно-техническая конференция «ЛЕОТЕСТ-2003» в Славском	53
БОНДАРЕНКО Ю. К. Международный форум «Ультразвуковая дефектоскопия 75»	55
РЕКЛАМА	57

ИЗДАНИЕ ЖУРНАЛА ПОДДЕРЖИВАЮТ:

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



Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики

TECHNICAL DIAGNOSTICS and NON-DESTRUCTIVE TESTING

Nº 2, 2003

Founded in January, 1989

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

Publisher: *International Association «Welding»*

EDITORIAL BOARD:

Editor-in-Chief
B. E. PATON

A. Ya. Nedoseka (vice-chief ed.),
V. A. Troitsky (vice-chief ed.),
Z. A. Maidan (exec. secr.),
I. P. Belokur, Yu. K. Bondarenko,
V. L. Vengrinovich, E. F. Garf,
A. A. Gruzd, Yu. B. Drobot,
V. I. Ivanov, O. M. Karpash,
V. V. Klyuev, L. M. Lobanov,
A. A. Lebedev, V. K. Lebedev,
G. G. Lutsenko, N. V. Novikov,
E. S. Pereverzhev,
P. P. Prokhorenko, V. P. Radko,
I. Ya. Shevchenko,
A. I. Stepanenko, V. A. Strizhalo,
A. Ya. Teterko, V. N. Uchanin,
A. F. Ulitko, T. M. Shvets,
N. N. Zatsepin,
A. V. Shimanovsky

Address:

The E. O. Paton Electric
Welding Institute
of the NAS of Ukraine,
11 Bozhenko str., 03680,
Kyiv, Ukraine
Tel.: (38044) 261 58 81,
269 26 23
Fax: (38044) 268 04 86
E-mail: journal@paton.kiev.ua
http://www.nas.gov.ua/pwj

Scientific editors:
N. G. Bely, A. A. Gruzd

Electron gallery:

I. R. Naumova, A. I. Sulyma,
N. N. Priymachenko,
I. V. Petushkov

State Registration Certificate
KV 4787 of 09.01.2001.
All rights reserved.
This publication and
each of the articles
contained here in are
protected by copyright.
Permission to reproduce material
contained in this journal
must be obtained
in writing from the Publisher.

CONTENTS

TECHNICAL DIAGNOSTICS

<i>LEBEDEV A.A., NEDOSEKA S.A., MUZYJA N.R., VOLCHEK N.L.</i> Evaluation of the condition of pipe metal after long-term operation in the main gas pipeline system	3
<i>AGAEV N.V.</i> Gas dynamic diagnostics of the process modes of pipeline system operation	9
<i>BARVINKO Yu.P., GOLINKO V.M.</i> On proposals to improve the facilities for diagnostics of the technical condition of oil and petroleum product tanks	12
<i>NAGORNY V.M., DYADYURA K.A.</i> Forecasting the moment of final adjustment of a technological system for machining with possible deviations from admissible values of the dimensions of the parts being treated	16

NON-DESTRUCTIVE CONTROL

<i>BEZLUDKO G.Ya.</i> Operational control of the fatigue condition and residual life of metal structures by nondestructive (coercimetric) method	20
<i>LUTSENKO G.G.</i> On the issue of the accuracy of measurement of equivalent diameter of the defect, when using ARD-diagrams	27
<i>DAVYDOV E.A., RADKO V.P.</i> Computerized NDT technology to determine the dimensions of discontinuities in welded joints of critical structures by the methods of the synthesized focusing aperture	32
<i>SAPRYKIN S.A., KOLBIN I.B., VOLKOV Yu.A., TOPCHII M.M., GORBENKO V.N.</i> Influence of the condition of the inner surface of workpieces on the ability to perform ultrasonic testing with transducers with a high radiation frequency	36
<i>KOZIN A.N.</i> Thickness measurement with ultrasonic thickness gauges with A-scan	41
<i>GUSEV A.P., KOSOVETS S.A.</i> Magnetic field of double defects of the type of corrosion cavities	45
<i>SLUSENKO K.K.</i> Monitoring the condition of electric motors, using CMVA60 and CMVA55 Microlog	48

CERTIFICATION AND QUALITY

<i>BONDARENKO Yu.K., POTAPYEVSKY A.G., ZHDANOV S.L., KOVALCHUK O.V.</i> Ensuring the quality and safety in performance of welding-erection work and technical diagnostics	50
---	----

CHRONICLES

<i>SHEKERO A.L.</i> 8th International Scientific-Technical Conference «LEOTEST-2003» in Slavsk	53
<i>BONDARENKO YU.K.</i> International Forum «Ultrasonik Defectoscopy 75»	55

ADVERTISING	57
--------------------------	----

Concerning publication of articles, subscription and advertising, please, contact the editorial board



ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА ТРУБ ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ В СИСТЕМЕ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

А. А. ЛЕБЕДЕВ, С. А. НЕДОСЕКА, Н. Р. МУЗЫКА, Н. Л. ВОЛЧЕК

Рассмотрен неразрушающий метод контроля состояния металла труб, основанный на определении характеристик рассеяния твердости. Показана эффективность метода и достаточно хорошая корреляция с данными, полученными методом акустического сканирования материала труб, имеющих разную степень эксплуатационной поврежденности.

The non-destructive method for inspection of the state of metal in pipes, based on evaluation of the hardness dispersion characteristics, is considered. The efficiency of the method and its sufficiently good correlation with the data generated by acoustic scanning of the pipe material with a differing degree of service damage are shown.

Введение. Техническое состояние трубопроводов, в частности, их линейных участков, зависит от многих конструкционных, эксплуатационных и технологических факторов, совокупность которых приводит к сложной схеме температурно-силового нагружения основного несущего элемента — трубы, и, как следствие, к высокой степени неопределенности ее напряженно-деформируемого состояния, к труднопредсказуемой кинетике деградации свойств металла. Поэтому при кажущейся простоте конструктивного исполнения трубопроводных систем надежный расчет их несущей способности и долговечности на этапе проектирования практически отсутствует, а оценку остаточного ресурса проводят на стадии эксплуатации по данным контроля текущего состояния металла труб, выполняемого в рамках плановых мероприятий по техническому обслуживанию трубопроводов.

К одной из наиболее серьезных причин отказа трубопровода являются необратимые изменения (деградация) структуры и физико-механических свойств материала трубы под действием различных температурно-силовых воздействий, коррозии, старения, химического взаимодействия с транспортируемым продуктом. Деградация металла, как показывает статистика, является причиной каждого второго отказа. Она связана с накоплением рассеянных повреждений различной природы, трансформирующихся в дефекты типа трещин, которые приводят к снижению уровня работоспособности трубы или к полному ее отказу по показателям функционирования (местная потеря устойчивости, нарушение плотности в результате разрыхления металла и т. п.).

Скорость деградации, естественно, зависит от природы материала, его исходного структурного состояния и условий работы, в частности, режима нагружения. Большой объем работы по анализу эксплуатационной нагруженности труб линейного участка нефтепровода «Дружба» и статистическому анализу результатов около 400000 измерений давления в течение 5 лет выполнен в Белорусском государственном университете транспорта под руководством профессора Л. А. Сосновского [1]. Показано, в частности, что давление в трубе изменяется циклически с коэффициентом асимметрии от

© А. А. Лебедев, С. А. Недосека, Н. Р. Музыка, Н. Л. Волчек, 2003

0 до 1 и является случайной величиной. В течение всего срока эксплуатации нефтепровода реализуются более 10^5 циклов, разрушения носят типичный усталостный характер с длительным периодом стадии накопления рассеянных повреждений. В исходном состоянии металла трещин на наружной поверхности трубы приблизительно в шесть раз больше, чем на внутренней, после эксплуатации трубы — наоборот, меньше в 1,5 раза.

Режим нагружения газопровода, естественно, носит более мягкий характер, с меньшей частотой существенных колебаний давления, поэтому замечено, что разрушение труб газопроводов происходит по квазистатическому типу, скорее — по механизму малоцикловой усталости. Однако и в этом случае контроль кинетики накопления повреждений в металле труб в процессе наработки как признака деградации материала, имеет огромное практическое значение.

Методы и задачи исследования. В настоящее время имеется обширная литература по способам оценки степени поврежденности металла в условиях эксплуатации по результатам прямых или косвенных измерений [2–4]. К числу наиболее результивных из тех, которые можно реализовать без разрушения исследуемой конструкции, следует отнести различные варианты метода акустической эмиссии (АЭ) и метод LM-твёрдости.

Акустические методы весьма информативны, хотя и требуют применения дорогостоящего приборного обеспечения и сложной процедуры обработки результатов измерений.

Метод твердости, напротив, характеризуется недостаточной информативностью и низкой точностью, поскольку корреляция между твердостью материала и его поврежденностью в большинстве случаев очень слабая и, как будет показано ниже, не всегда однозначна.

В настоящем исследовании проведен сравнительный анализ оценки поврежденности материала методом акустического прозвучивания [2], проведенного на образцах, вырезанных из различных трубопроводов Украины, находящихся в длительной эксплуатации, и метода LM-твёрдости [3], в котором в качестве информационных признаков состояния системы выбраны характеристики распределения показателей твердости металла труб.



На основе прозвучивания металла действующих газопроводов сигналами акустической эмиссии в работе [2] сформулирован критерий оценки поврежденности, связанный с изменением скорости нарастания принимаемого сигнала, и показана его связь с разрыхлением материала, определяемым путем взвешивания малых проб в жидкости.

Метод LM-твердости также имеет убедительное экспериментальное подтверждение при наработке в условиях кратковременного и длительного, в том числе циклического нагружения [4]. Физическое обоснование этого метода состоит в том, что рассеяние по крайней мере механических характеристик присуще всем материалам, а степень его рассеяния зависит в основном от структурного состояния. Поэтому об изменении структурного состояния, т.е. о деградации материала в заданных условиях работы, в том числе за счет старения под напряжением, можно судить по степени рассеяния характеристик его механических свойств, в том числе твердости, определение которой в любом объеме проводится без разрушения изделия и не требует сложной аппаратуры.

При наличии достаточно большой совокупности характеристик твердости, которые получены с помощью массовых измерений, используя те или иные законы распределения, можно определить параметры этих распределений, и в дальнейшем использовать их для оценки структурной неоднородности материала.

Существует большой опыт использования в механике материалов, а именно, при построении статистических теорий прочности, распределения Вейбулла [5], в котором параметр m , имеющий смысл коэффициента гомогенности, можно определить по формуле Гумбеля [6]. Применительно к испытаниям на твердость эта формула имеет вид

$$m = 0,4343d_n \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\lg H_i - \overline{\lg H})^2 \right]^{-1/2}, \quad (1)$$

где величину d_n определяют в зависимости от числа n измерений; H_i — значение твердости по i -му измерению; $\overline{\lg H} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg H_i$ — среднее значение логарифмов твердости по результатам n измерений.

Испытания, проведенные с использованием метода твердости, показали, что достаточный для допустимой точности оценки однородности материала объем испытаний составляет $n = 20...30$ измерений. Естественно, что большим значениям коэффициента m соответствует низкий уровень рассеяния характеристик твердости и, соответственно, лучшая организация структуры, низкий уровень поврежденности. Меньшим значениям, наоборот, соответствует более высокий уровень поврежденности. Отметим, что уровню рассеяния определяемого свойства, в том числе твердости, можно ставить в соответствие и другие статистические критерии, например, коэффициент вариации, показывающий насколько велико рассеяние величин, составляющих рассматриваемую совокупность, по сравнению со средним значением,

$$v = \frac{1}{H} \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H})^2 \right]^{1/2}, \quad (2)$$

где H_i , H и n имеют тот же смысл, что и в (1).

Ниже представлены результаты исследования описанным методом состояния металла труб, изготовленных из низколегированных ферритно-перлитных сталей 17Г1С, 17ГС (отечественного) и 13030 (чех. производства), после эксплуатационной наработки от 15 до 48 лет в системе газопроводов Украины. Все пробы металла были взяты для испытаний только с тех действующих газопроводов, у которых сохранились резервные трубы с исходным состоянием металла.

В проведенных ранее исследованиях [2] для прозвучивания призматических образцов использовали АЭ систему диагностики «EMA-2». Непосредственно на тех же образцах, на которых проводили измерение твердости, был получен большой объем данных по изменению акустических свойств указанных металлов. Это позволило провести корректное сопоставление зависимостей поврежденности от эксплуатационной наработки, полученных на основе как акустических данных, так и измерения твердости.

Химический состав металла труб исследован на сканирующем микроскопе «Camscan» с рентгеновским спектрометром System 860 CP2-50. Результаты измерений показали, что содержание кремния и марганца во всех сталях, включая чехословацкую, находятся в пределах верхних значений этих элементов, регламентируемых ГОСТ для сталей 17Г1С и 17ГС, содержание хрома и никеля — в пределах сертификационных значений на поставку. Никелевый эквивалент сталей находится в интервале значений 4,283...4,394. Основные механические характеристики сталей находятся в таких пределах: временное сопротивления $\sigma_B = 490...550$ МПа, условный предел текучести $\sigma_{0,2} = 340...355$ МПа, остаточное удлинение $\delta > 22\%$, ударная вязкость КСИ = 0,34...0,40 МДж/м².

Изменения химического состава за период эксплуатации находятся в пределах, не превышающих допустимых для используемой аппаратуры погрешностей.

Результаты исследования методом LM-твердости. Схема вырезки образцов для испытаний показана на рис.1. Из каждой трубы-свидетеля и трубы с наработкой было изготовлено по три образца размером 10×10 мм с высотой, равной толщине стенки. Поверхности образцов, соответствующие внутренней и наружной сторонам трубы, были подготовлены для испытаний на твердость по Бринеллю на стандартном твердомере с нагрузкой 150 Н на индентор с углом при вершине 136°.

В качестве характеристики рассеяния принимался коэффициент вариации (2), рассчитанный по результатам не менее 25 измерений. В расчет принималось среднее из трех полученных значений коэффициента вариации, за исключением небольшого количества случаев, когда одно из трех значений имело характер явного выброса. Эти значения из дальнейших обсуждений исключались.

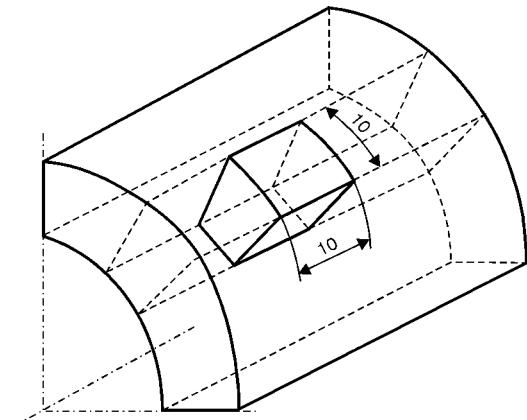


Рис. 1. Схема вырезки образцов

Название газопровода, размер трубы, марка стали и срок эксплуатации трубопровода (до 1996 г.), а также результаты обобщения данных измерений приведены в таблице.

Как видно, значения твердости исходного металла труб разных трубопроводов отличаются, причем в большей степени с наружной стороны; имеется различие в твердости металла, но в значительно меньшей мере, и в пределах одной трубы — со стороны наружной и внутренней поверхностей, в то же время их средние (по всем трубопроводам) значения отличаются незначительно $HV = 157,5$ МПа — со стороны наружной и $HV = 155,5$ МПа — со стороны внутренней поверхности.

Приведенные данные, характеризующие механические свойства металла труб в исходном состоянии свидетельствуют об их сравнительно небольшом различии, что обеспечивается прежде всего единой природой и близким химическим составом сталей по основным элементам. Это дает основание рассматривать экспериментальные данные, полученные на разных трубопроводах после различной длительности их эксплуатации, как результаты исследования состояния металла трубы из низколегированной феррито-перлитной стали в составе некоторого виртуального газопровода на разных стадиях эксплуатации. Такой подход, как показано ниже, позволяет установить, по крайней мере, качественные закономерности деградации в процессе наработки металла труб из стали указанного класса.

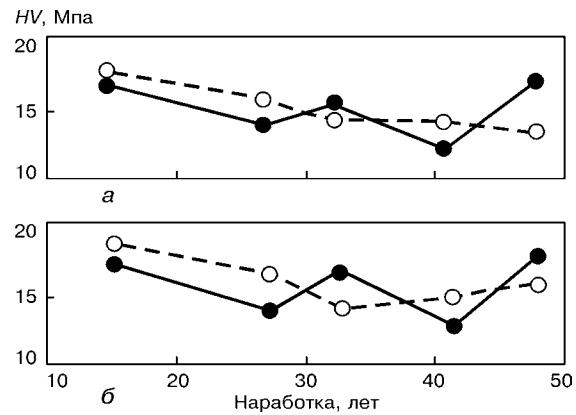


Рис. 2. Твердость исходного материала (темные точки) и материала после соответствующей наработки (светлые точки): *a*, *b* — для металла наружных и внутренних слоев соответственно

Предлагаемая модель основана на предположениях об относительно одинаковых свойствах металла труб в исходном состоянии, относительно одинаковых условиях механического нагружения труб и относительно одинаковых параметрах температурнохимических воздействий. Естественно, что эти предположения для рассматриваемого виртуального газопровода в большей или меньшей степени не выполняются, чем и объясняются заметные отклонения обсуждаемых ниже экспериментальных результатов от соответствующих среднестатистических значений. Тем не менее, такой подход позволяет достаточно четко проследить основные тенденции процесса деградации свойств металла труб. В процессе эксплуатации твердость металла труб в разных газопроводах, как видно из рис. 2, изменяется неоднозначно: она может как увеличиваться (трубопроводы 1, 2, 4), так и снижаться (трубопроводы 3, 5). Причину этой неоднозначности пока трудно объяснить физически. Однако этот экспериментально установленный факт сам по себе имеет большое практическое значение: он является еще одним прямым доказательством того, что твердость не всегда является параметром, по изменению которого можно адекватно судить об изменении состояния металла, т. е. о его деградации. Данные о рассеянии характеристик твердости металла труб в исходном состоянии (темные точки) и после наработки различной продолжи-

Таблица 1. Результаты исследования металла труб газопроводов

Номер	Газопровод	Размер трубы, мм	Материал трубы	Эксплуатационная наработка, лет	Твердость HV , МПа		Коэффициент вариации	
					Н	В	Н	В
1	Новопсков–Краматорск	1020×8	17Г1С	15	18,4 18,6	17,1 18,2	1,03 1,77	1,06 2,00
2	Шебелинка–Славянск	720×8	17ГС	27	14,0 16,8	14,1 16,9	1,35 2,10	2,25 2,60
3	Диканька–Кременчуг	720×8	17ГС	32	16,2 16,0	16,1 15,8	1,36 1,75	1,72 2,14
4	Дашава–Киев	508×9,5	13030 (Чех.)	41	12,6 14,4	13,1 14,2	1,61 2,57	2,46 5,30
5	Дашава–Киев	508×9,5	13030 (Чех.)	48	17,6 14,1	17,4 15,6	1,91 3,10	1,90 5,04

Примечание. Над чертой приведены значения для металла трубы в исходном состоянии, под чертой — для металла после соответствующего срока эксплуатации трубы. HV — среднее значение твердости трубы по результатам не менее 25 измерений со стороны наружной (Н) и внутренней (В) поверхностей трубы



тельности (светлые точки) в оценке коэффициентом вариации приведены на рис. 3, из которого видно, что металл труб в исходном состоянии, судя по рассеянию характеристик твердости, можно считать сравнительно однородным. Однако степень однородности металла наружных и внутренних слоев неодинакова. Средние по всем трубам значения коэффициента вариации металла с внутренней стороны значительно выше ($v_{B_{cp}} = 0,190$) соответствующего среднего значения коэффициента металла наружных слоев ($v_{H_{cp}} = 0,142$), что свидетельствует о его сравнительно высокой исходной поврежденности и, следовательно, более низком качестве. Именно это является, очевидно, одной из главных причин повышенного темпа роста в процессе наработки коэффициента вариации v_B металла внутреннего слоя в сопоставлении с коэффициентом v_H .

Значения коэффициентов вариации v , определяемые по рассеянию характеристик твердости металла на различных стадиях эксплуатации рассматриваемого виртуального газопровода, хорошо аппроксимируются следующими уравнениями регрессии:

для металла наружных слоев

$$v_H = 1,42^{(0,1X^2 + 1)}, \quad (3)$$

для металла внутренних слоев

$$v_B = 1,9^{(0,07X^2 + 1)}. \quad (3a)$$

На рис. 3 эти кривые показаны сплошными линиями, X — десятая часть эксплуатационной наработки в годах.

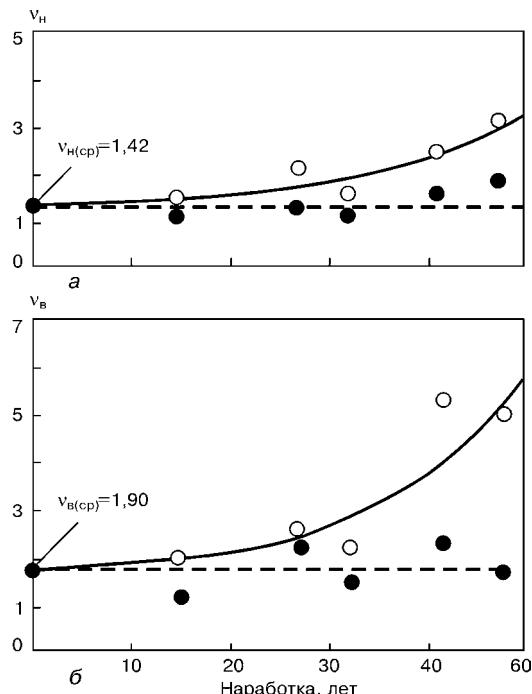


Рис. 3. Коэффициенты вариации характеристик твердости исходного материала (темные точки) и после соответствующей наработки (светлые точки). Сплошные линии — аппроксимация опытных данных по уравнениям регрессий (3) и (3а) (а, б — то же, что и на рис. 2)

Различный темп роста коэффициентов v_H и v_B в процессе работы газопровода особенно заметен после 25 лет эксплуатации, когда деградация металла внутренних слоев происходит особенно интенсивно. Так, если за первые 25 лет работы значения коэффициентов v_H и v_B возросли соответственно с 1,14 до 1,63 и с 1,90 до 2,27, то за последующие 25 лет, судя по аппроксимирующими кривым, они достигнут значений 3, 41 и 5,84. При этом темп роста коэффициента v_B значительно опережает таковой коэффициента v_H .

Для иллюстрации на рис. 4 приведена кривая, характеризующая изменение соотношения v_B/v_H за весь период эксплуатации газопровода с прогнозом до 60 лет. Видно, что если поврежденность металла внутреннего слоя в исходном состоянии превышала поврежденность металла наружного слоя приблизительно на одну треть, то к шестидесяти годам эксплуатации это превышение темпа достигнет почти 100 %.

Поврежденность металла наружных и внутренних слоев в оценке коэффициентами вариации за 60 лет эксплуатации увеличится в 3,5 и более чем в 5 раз соответственно, а абсолютные значения коэффициентов вариации достигнут величин $v_H = 5,02$ и $v_B = 9,58$.

Таким образом, представленные данные показывают, что по характеристикам твердости металла нельзя судить о его текущем состоянии и, следовательно, прогнозировать свойства металла трубы в процессе эксплуатации. Более представительными являются характеристики рассеяния его свойств, в частности коэффициент вариации или коэффициент гомогенности по Вейбуллу. Применительно к диагностике металла трубопроводов без их разрушения к наиболее показательным следует отнести характеристики рассеяния твердости.

Сопоставление с данными акустических исследований. Критерий поврежденности, представленный параметром W [2], позволяет связать акустические свойства материала с его деградацией. Величина W может меняться от 0 (неповрежденный материал) до 1 (поврежденный материал).

Кривые, связывающие параметр поврежденности W со сроком эксплуатационной наработки рассматриваемого виртуального газопровода, можно описать экспоненциальными уравнениями

$$W_H = 0,021e^{0,0787t}, \quad (4)$$

$$W_B = 0,1331e^{0,0336t}, \quad (4a)$$

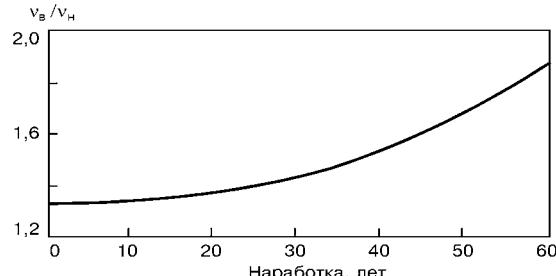


Рис. 4. Изменение соотношения между коэффициентами вариаций характеристик твердости внутренних и наружных слоев в процессе наработки



для наружных и внутренних слоев соответственно, где t — срок эксплуатационной наработки в годах.

На рис. 5 представлены графики зависимости параметра W от эксплуатационной наработки с экспоненциальными линиями тренда, описываемыми уравнениями (4) и (4а). Как видим, характер кривых аналогичен характеру кривых рассеяния твердости. Это указывает на то, что между принятыми параметрами АЭ прозвучивания (W) и метода LM-твёрдости (v) существует устойчивая корреляция.

С целью оценки качества корреляции аппроксимируем результаты, полученные методом LM-твёрдости, как и в случае анализа результатов АЭ-сканирования, экспоненциальной функцией. Для этого представим характеристики рассеяния v_i в относительных величинах $V_i = v_i / |v|$, взяв за базовую величину максимальное значение, полученное для металла трубы со стороны ее внутренней поверхности после 48-летней эксплуатационной наработки. У этого металла, естественно, $V = V_{\max} / V_{\min} = 1$, а в остальных местах измерений $0 \leq V_i \leq 1$.

Оптимальные значения параметров экспоненциальной функции, аппроксимирующей экспериментальные данные, полученные методом LM-твёрдости, определены с использованием пакета анализа программы Microsoft Excel. XP.

Полученное корреляционное уравнение имеет вид для металла наружной поверхности

$$V_H = 0,501v_H - 0,69, \quad (5)$$

для металла внутренней поверхности

$$V_B = 0,198v_B - 0,21. \quad (5a)$$

Кривые, связывающие параметр поврежденности V со сроком эксплуатационной наработки, после

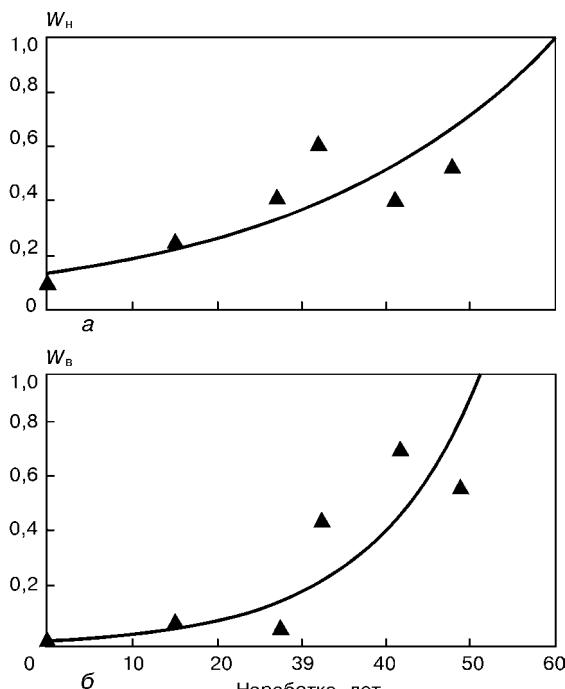


Рис. 5. Зависимости поврежденности металла труб от наработки по результатам испытаний акустическим методом для наружных (а) и внутренних слоев (б)

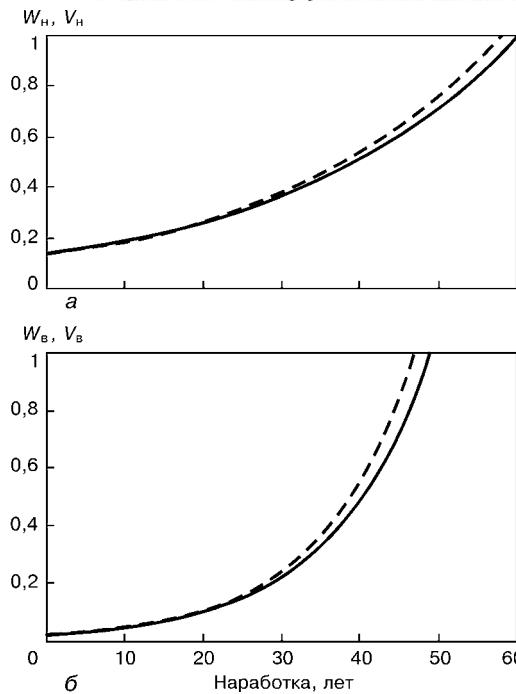


Рис. 6. Сопоставление характеристик поврежденности, определенных акустическим методом (сплошная кривая) и методом рассеяния твердости (штриховая) для наружных (а) и внутренних слоев (б)

такого преобразования можно описать экспоненциальными уравнениями:

$$V_H = 0,0210e^{0,0833t}, \quad (6)$$

$$V_B = 0,1293e^{0,0353t} \quad (6a),$$

для наружных и внутренних слоев соответственно; где t — срок эксплуатационной наработки в годах.

Ниже представлены данные, иллюстрирующие достаточно хорошее совпадение кривых $V_H(t)$, $W_H(t)$ для наружных слоев (рис. 6, а) и $V_B(t)$, $W_B(t)$ для внутренних слоев (рис. 6, б). Наиболее важным является то, что оба метода в результате прогнозируют почти одинаковый остаточный ресурс диагностируемого виртуального трубопровода.

Проведенный корреляционный анализ показал, что для наружных слоев коэффициент корреляции экспоненциальных кривых поврежденности составляет 89,86 %, а для внутренних слоев 90,72 %.

Таким образом, оба используемых метода оценки состояния металла трубопроводов, основанные на концепции связи эксплуатационной поврежденности с параметрами V и W свойств материала, могут быть использованы для получения достоверных данных о реальном состоянии металла труб.

Выводы

1. Метод оценки поврежденности металлов, основанный на анализе характеристик рассеяния твердости, может быть использован на практике. Преимуществом метода является относительно невысокая стоимость измерительного оборудования.

2. Сопоставление данных оценки поврежденности методом, основанным на получении акустических характеристик материала методом прозвучивания, и методом, основанным на анализе рассеяния твердос-



ти, показало достаточно хорошую корреляцию результатов, что позволяет рекомендовать методы как взаимозаменяемые или взаимодополняющие.

3. В настоящее время большая часть линейных участков газопровода «Дашава–Киев» находится в эксплуатации около 55 лет. За это время, как следует из приведенных данных, поврежденность металла труб значительно увеличилась. Это обстоятельство, а также все возрастающий по мере эксплуатационной наработки темп роста поврежденности, свидетельствует о необходимости проведения срочных работ по тщательному диагностированию технического состояния данного трубопровода и принятию эффективных мер по обеспечению его надежности.

1. Сосновский Л. А., Воробьев В. В. Влияние длительной эксплуатации на сопротивление усталости трубной стали // Пробл. прочности. – 2000. – № 6. – С. 44–53.
2. Комплексная оценка поврежденности металла действующих газопроводов / А. А. Лебедев, А. Я. Недосека, Н. Г. Чайсов,

Ин-т проблем прочности НАН Украины,
МГП «Индпром»,
Киев

3. А. Недосека, И. О. Богинич // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2001. – № 1. – С. 8–12.
3. Патент 52107A/MKI⁷, G 01 №3/00, G 01 №3/40. Способ оцінки деградації матеріалу внаслідок накопичення пошкоджень в процесі напрацювання «Метод LM- твердості» А. О Лебедев., М. Р. Музика, Н. Л. Волчек. – Опубл. 16.12.02. – Бюл. № 12.
4. Лебедев А. А., Музика Н. Р., Волчек Н. Л. Определение повреждаемости конструкционных материалов по параметрам рассеяния характеристик твердости // Пробл. прочности. – 2002. – № 4. – С. 5–12.
5. Weibull W. A statistical distribution function of wide applicability // J. of Appl. Mechanics. – 1951. – Vol 18. – №3. – Р. 293–297.
6. Гумбель Э. Статистика экстремальных значений. – М: Мир. – 1965. – 320с.
7. Дродз М. С. Определение механических свойств металла без разрушения. – М.: Металлургия. 1965. – С. 147–156.
8. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / Под ред. Патона Б. Е. – Киев. Изд.-во метод. литературы и наглядных пособий ТК-78. – 1996. – 140 с.
9. Махутов Н. А., Зацаринный В. В., Базарас Ж. Л. и др. Статистические закономерности малоциклового разрушения – М.: Наука. – 1989. – 253 с.

Поступила в редакцию
10.04.2003

В Техническом комитете Украины № 78 «ТДНК»

Технический комитет Украины по стандартизации № 78 "Техническая диагностика и неразрушающий контроль" ТКУ-78 «ТДНК» и Главный учебно-методический центр Госнадзорохранруды Украины (ГУМЦ)

в 2003 г. приступили к совместной подготовке технических экспертов по новой специализации: «Выполнение работ по акустико-эмиссионному (АЭ) диагностированию на объектах котлонадзора, газонефттехнического комплекса и подъемных сооружений».

Разработан и утвержден соответствующий учебно-тематический план, рассчитанный на срок обучения 24 дня. Этот план предусматривает два тематических раздела: первый – посвящен специализированным вопросам экспертного обследования объектов повышенной опасности; второй – общим положениям по диагностированию; практике и промышленному использованию АЭ средств; изучению АЭ аппаратуры и систем; практическим занятиям с использованием основных средств технической диагностики.

По вопросам организации групп подготовки экспертов по АЭ диагностированию обращаться в ГУМЦ Госнадзорохранруды Украины:
04060, г. Киев ул. Вавилова, 10А ГУМЦ
Тел./факс: 440-14-77



ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ

Н. Б. АГАЕВ

Решены задачи диагностирования динамического состояния трубопроводной системы на основе передаточных функций.

Is solved tasks of diagnosing dynamic condition of pipeline systems because of transfer functions.

Развитие средств автоматики, переход к автоматизации сложных технологических процессов и современным методам управления производством ставят ряд задач, успешное решение которых требует новых способов обработки информационных потоков. Эти способы должны быть основаны на глубоком изучении свойств, законов и динамики процессов, протекающих в функционирующих системах. В частности возникает необходимость в разработке простых, эффективных и достаточно надежных методов определения и прогнозирования не только технического, но и технологического состояния по текущей информации о выходных и входных сигналах исследуемых систем.

Идея использования передаточных функций в качестве диагностирующих критериев при решении задач диагностирования газодинамического состояния трубопроводных систем предложена в работе [1] и получила дальнейшее развитие в работах [2]. В классическом понимании под словом «диагностика» подразумевается «техническая диагностика». Несмотря на разработку многочисленных методов и внедрение огромного количества приборных методов контроля технического состояния газопроводных систем, они еще значительно отстают от потребностей практики, не отвечают современным требованиям эксплуатации распределительных систем газоснабжения.

Пренебрегая влиянием внешних факторов, можно утверждать, что всякое изменение состояния диагностируемого объекта приводит к изменению не только его технических параметров, но и параметров протекающих процессов. Так как процесс трубопроводного транспорта газа является сложным технологическим процессом, то может быть построено семейство различных моделей, отражающих различные его особенности.

При решении задач диагностирования технологических ситуаций трубопроводного транспорта газа важно правильно описать поведение самого объекта в конкретных ситуациях. В тоже время при эксплуатации систем трубопроводного транспорта газа (особенно магистральных газопроводов) требуется оперативное, но относительно точное определение состояния системы, так как сама система носит инерционный характер в отношении незначительного изменения газодинамических параметров.

Постановка задачи. Параметры газового потока, как правило, имеют стохастическую природу

© Н. Б. Агаев, 2003

вследствие влияния на него внешних неконтролируемых факторов, а также случайных погрешностей при их измерениях. В отношении внешних факторов и случайных погрешностей только передаточные функции системы являются инвариантными, так как они зависят от физических характеристик системы и конкретный вид определяется в зависимости от математической модели происходящего в системе процесса. Кроме того, многочисленными исследованиями доказано, что большинство технологических процессов трубопроводного транспорта газа допускает с необходимой для практических расчетов точностью эквивалентирование линейными математическими моделями. Поэтому для дальнейшего исследования в качестве основной модели процессов перекачки газа по горизонтальным участкам газопровода используется линеаризованные уравнения движения газа в трубопроводе.

Решение задачи. На основе принятой модели и при известных значениях давления на концевых участках газопровода напишем функции расхода в начале и в конце в безразмерном временном масштабе в изображениях Лапласа:

$$\bar{\tau} = \frac{c^2}{2al^2} t, \quad (1)$$

$$G(0, S) = P(0, S) \frac{\sqrt{S}}{2al} \frac{\operatorname{ch}\sqrt{S}}{\operatorname{sh}\sqrt{S}} - P(L, S) \frac{\sqrt{S}}{2al} \frac{1}{\operatorname{sh}\sqrt{S}}, \quad (2)$$

$$G(L, S) = P(0, S) \frac{1}{2al} \frac{\operatorname{ch}\sqrt{S}}{\operatorname{sh}\sqrt{S}} - P(L, S) \frac{\sqrt{S}}{2al} \frac{\operatorname{ch}\sqrt{S}}{\operatorname{sh}\sqrt{S}},$$

где $2al$ — коэффициент линеаризации по Чарному, $1/\text{с}$; c — скорость звука в газе, $\text{м}/\text{с}$; L — длина газопровода, м ; S — безразмерный параметр преобразования Лапласа; $P(0, S)$; $P(L, S)$ и $G(0, S)$; $G(L, S)$ — соответственно функции давления и расхода в начале и в конце газопровода.

Введем обозначения:

$$\begin{aligned} K_1(S) &= \sqrt{S} \operatorname{cth}\sqrt{S}, \\ K_2(S) &= \sqrt{S} \operatorname{cosech}\sqrt{S}. \end{aligned} \quad (3)$$

Графики функций $K_1(S)$ и $K_2(S)$ показаны на рис. 1. Как видно из выражения (3), $K_1(S)$ и $K_2(S)$ не зависят от влияния внешних факторов (от характера изменения газодинамических параметров потока) и остаются инвариантными при любом виде

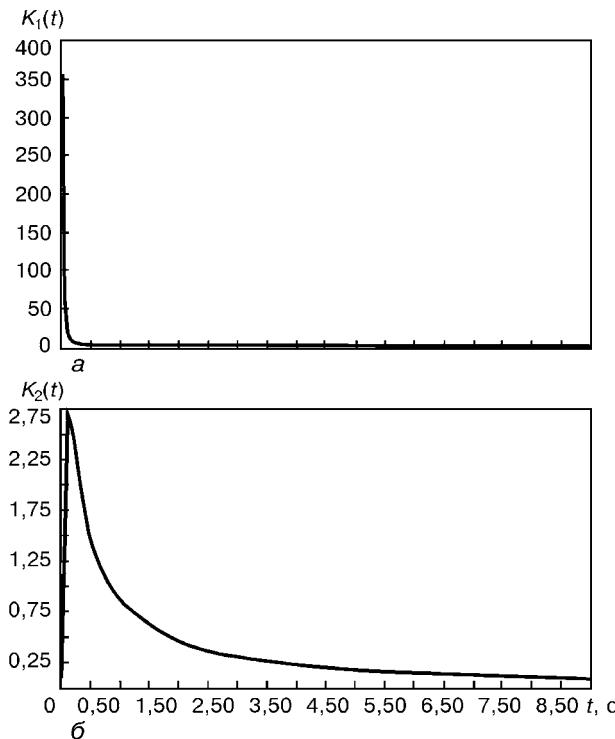


Рис. 1. Зависимости передаточных функций систем $K_1(t)$ (а) и $K_2(t)$ (б) от времени

их изменения. Это свойство передаточных функций позволяет использовать ее в качестве эталона при диагностировании газодинамического состояния систем трубопроводного транспорта газа.

Из выражения (2) определяем $K_1(S)$ и $K_2(S)$ и, чтобы отличать их от функции (3), обозначим $\overline{K_1(S)}$ и $\overline{K_2(S)}$:

$$\begin{aligned}\overline{K_1(S)} &= \frac{2al}{2} \left[\frac{G(0, S) + G(L, S)}{P(0, S) - P(L, S)} + \frac{G(0, S) - G(L, S)}{P(0, S) + P(L, S)} \right], \\ \overline{K_2(S)} &= \frac{2al}{2} \left[\frac{G(0, S) + G(L, S)}{P(0, S) - P(L, S)} + \frac{G(0, S) - G(L, S)}{P(0, S) + P(L, S)} \right].\end{aligned}\quad (4)$$

Суть диагностирования с помощью передаточных функций системы заключается в следующем: передаточные функции, определяемые по формулам (3), при изменении технологических режимов остаются неизменными, поэтому для диагностирования происходящих в системе процессов они используются как эталонные, а функции, определяемые по формулам (4), зависят от изменения технологических параметров режима. Если результаты вычислений по формулам (3) и (4) совпадают, то можно принять, что система функционирует в нормальном режиме, в обратном же случае происходит нарушение технологического режима. В качестве критерия совпадения двух функций можно использовать следующие:

$$R_{\tilde{K}_i \tilde{K}'_i}(\tau) \approx 1, \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned}\tilde{K}_i(\tau) &= \int_0^\tau |K_i(t)| dt, \\ \tilde{K}'_i(\tau) &= \int_0^\tau |\overline{K}_i(t)| dt,\end{aligned}\quad (6)$$

$R_{\tilde{K}_i \tilde{K}'_i}(\tau)$ — взаимно-корреляционная функция.

Отметим, что при долговременном нормальном функционировании в любой газотранспортной системе становятся стабильными такие статистические параметры газового потока, как математическое ожидание и дисперсия. Кроме того, многочисленные исследования показали, что всякий газодинамический параметр газового потока можно аппроксимировать с практической точки зрения точности гармоническими функциями:

$$f(t) = M_f + \sigma_f \sin \omega_f t. \quad (7)$$

При постоянном значении математического ожидания и дисперсии можно центрировать значение газодинамического параметра $f(t)$ с помощью подстановки

$$\tilde{f}(t) = \frac{f(t) - M_f}{\sigma_f},$$

в результате выполнения которой получена аппроксимирующая функция в виде:

$$\tilde{f}(t) = \sin \omega_f t. \quad (8)$$

Действительно, при нормальном режиме функционирования газотранспортная система обладает инерционностью по отношению к газодинамическому параметру газового потока. Поэтому на любом промежутке времени, в течение которого проводится контроль газодинамических параметров, математическое ожидание и дисперсия параметра газового потока не сильно отличаются от их статистически точных значений.

Определим изображение Лапласа (8)

$$f(S) = \frac{\omega_f}{S^2 + \omega_f^2}.$$

Подставляя полученные выражения для каждой функции газодинамического параметра в (5), записываем:

$$\begin{aligned}\overline{K_1(S)} &= \frac{1}{2} [A(S) + B(S)], \\ \overline{K_2(S)} &= \frac{1}{2} [A(S) - B(S)],\end{aligned}\quad (9)$$

где

$$A(S) = \frac{\omega_{G_0} + \omega_{G_L} (S^2 + \omega_{G_0} \omega_{G_L})(S^2 + \omega_{P_0}^2)(S^2 + \omega_{P_L}^2)}{\omega_{P_0} - \omega_{P_L} (S^2 + \omega_{G_0}^2)(S^2 + \omega_{G_L}^2)(S^2 - \omega_{P_0}^2 \omega_{P_L})}, \quad (10)$$



Динамика падения давления в начале/конце опытного участка промышленного газопровода «Компрессор- завод» при аварийной утечке газа

$$B(S) = \frac{\omega_{G_0} - \omega_{G_L}}{\omega_{P_0} + \omega_{P_L}} \cdot \frac{(S^2 - \omega_{G_0} \omega_{G_L})(S^2 + \omega_{P_0}^2)(S^2 + \omega_{P_L}^2)}{(S^2 + \omega_{G_0}^2)(S^2 + \omega_{G_L}^2)(S^2 - \omega_{P_0}^2 \omega_{P_L})}. \quad (10)$$

Переход от изображения к оригиналу для $K_1(S)$ и $K_2(S)$ не представляет трудности:

$$\begin{aligned} A(\tau) &= \frac{(\omega_{P_0}^2 - \omega_{G_0}^2)(\omega_{P_L}^2 - \omega_{G_0}^2)}{(\omega_{P_0} - \omega_{P_L})(\omega_{G_0}^2 + \omega_{P_0} \omega_{P_L})} \sin \omega_{G_0} \tau + \\ &+ \frac{(\omega_{P_0}^2 - \omega_{G_L}^2)(\omega_{P_L}^2 - \omega_{G_L}^2)}{(\omega_{P_0} - \omega_{P_L})(\omega_{G_L}^2 + \omega_{P_0} \omega_{P_L})} \sin \omega_{G_L} \tau - \\ &- \frac{(\omega_{G_0} + \omega_{G_L})(\omega_{G_0} \omega_{G_L} - \omega_{P_0} \omega_{P_L}) \sqrt{\omega_{P_0} \omega_{P_L}}}{(\omega_{G_0}^2 - \omega_{P_0} \omega_{P_L})(\omega_{G_L}^2 - \omega_{P_0} \omega_{P_L})} \operatorname{Sh} \sqrt{\omega_{P_0} \omega_{P_L}} \tau, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} B(\tau) &= \frac{(\omega_{P_0}^2 - \omega_{G_0}^2)(\omega_{P_L}^2 - \omega_{G_0}^2)}{(\omega_{P_0} + \omega_{P_L})(\omega_{P_0} \omega_{P_L} - \omega_{G_0}^2)} \sin \omega_{G_0} \tau + \\ &+ \frac{(\omega_{P_0}^2 - \omega_{G_L}^2)(\omega_{P_L}^2 - \omega_{G_L}^2)}{(\omega_{P_0} + \omega_{P_L})(\omega_{P_0} \omega_{P_L} - \omega_{G_L}^2)} \sin \omega_{G_L} \tau - \\ &- \frac{(\omega_{G_0} - \omega_{G_L})(\omega_{G_0} \omega_{G_L} + \omega_{P_0} \omega_{P_L})(\omega_{P_0}^2 - \omega_{P_0} \omega_{P_L})(\omega_{P_L}^2 - \omega_{P_0} \omega_{P_L})}{(\omega_{P_0} + \omega_{P_L})(\omega_{G_0}^2 - \omega_{P_0} \omega_{P_L})(\omega_{G_L}^2 - \omega_{P_0} \omega_{P_L}) \sqrt{\omega_{P_0} \omega_{P_L}}} \times \\ &\times \sin \sqrt{\omega_{P_0} \omega_{P_L}} \tau. \end{aligned}$$

Следует отметить, что при вычислении передаточных функций по формулам (3) и (4) безразмерное время τ не представляет особого интереса, так как нас интересует форма кривых и время проведения эксперимента.

Численный эксперимент. Для проведения численного эксперимента выбран результат натурных экспериментов, проведенных на промышленном магистральном газопроводе «Компрессор- завод» с целью определения закономерностей изменения параметров газового потока при аварийном режиме в различных условиях эксплуатации [3]. Длина газопровода 18 км, диаметр 400 мм, производительность 1,37 млн м³/сут. Авария газопровода имитировалась истечением газа через свечи диаметром 100 мм с пробковыми кранами, которые были установлены в пяти километрах от начала газопровода. Результаты экспериментов, по которым вычислены значения передаточных функций по формулам (4) приведены в таблице. По формулам (5) и (6) вычислены коэффициенты корреляции (так как рас-

Время, с	Давление, МПа	Относительный расход
0	1,38 / 1,20	1,1 / 1,0
300	1,28 / 1,10	1,16 / 1,1
600	1,20 / 0,99	1,4 / 1,3
900	1,15 / 0,80	1,6 / 1,42
1200	1,10 / 0,78	1,7 / 1,6
1500	0,91 / 0,77	1,9 / 1,7
1800	0,90 / 0,76	2,0 / 1,75
2100	0,90 / 0,74	1,8 / 1,7
2400	0,90 / 0,72	1,5 / 1,4
2700	0,90 / 0,70	1,3 / 1,2
3000	0,90 / 0,70	1,2 / 1,1
3300	0,90 / 0,70	1,1 / 1,0

сматривались дискретные данные), которые для каждой передаточной функции оказались приблизительными. В первом случае значения коэффициента корреляции равны 0,83 и 0,65, во-втором — 0,76 и -0,83 для $K_1(t)$ и $K_2(t)$ соответственно, что свидетельствует о ненормальном функционировании газопровода.

Выводы

1. Предложено методика диагностирования газодинамического состояния трубопроводной системы транспортировки газа на основе линейной модели движения газа в трубах.

2. Даны аналитические формулы критериев диагностирования на основе взаимно-корреляционных функций интегралов передаточных функций.

3. Проведен численный анализ на основе эксплуатационных данных при нормальном функционировании системы. Для искусственно имитированных аварийных ситуаций проверена чувствительность разработанных моделей.

1. Rustamov K. A., Agayev N. B. Deterministic- Statictic methods for diagnosing a state of gas transportation systems. — Third Baku International Congress on energy, ecology, esconomy. — Baku, 1995. — P. 54.
2. Рустамов К. Э., Агаев Н. Б., Абдуллаев Н. М., Гулиев О. Ф. Системный подход к решению задач диагностирования состояний трубопроводных систем. — Изв. НАН Азербайджана. Науки о земле. — Баку. — 2000. — № 2. — С. 164–168.
3. Рустамов К. Э., Абдуллаев М. Н., Агаев Н. Б., Алиев И. К. Об одной методике моделирования физических процессов неустановившегося течения газа в сложных газотранспортных системах. — Деп. в АзНИИНТИ, № 1814-Аз 25.04.1992. ДНР №9.

Азербайджан. архитектур.-строит. ун-т,
Баку

Поступила в редакцию
25.01.2003



О ПРЕДЛОЖЕНИЯХ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ БАЗЫ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РЕЗЕРВУАРОВ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ

Ю. П. БАРВИНКО, В. М. ГОЛИНЬКО

Рассмотрены предложения ряда авторов о необходимости совершенствования базы диагностики резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов. Показано, что существующая база диагностики обеспечивает требуемую работоспособность стальных конструкций резервуаров. При этом главной фигурой, от которой зависит качество диагностики и работоспособность конструкции является инспектор высокой квалификации. Применение различных программных средств (ПС), получающих информацию о техническом состоянии конструкции от установленных на ней датчиков, на данном уровне развития ПС может рассматриваться как дополнительная информация к выполняемой диагностике. Обращено внимание на необходимость повышения квалификации инспекторов, создание инженерных школ диагностики сварных металлических конструкций.

Considered are proposals made by a number of authors on the necessity to improve facilities for diagnostics of oil and oil product storage tanks. It is shown that the existing diagnostic facilities provide the required performance of steel tank structures. In this case the main figure whom the quality of diagnostics and performance of a structure depend upon is an inspector having high skills in the field. The use of different types of software to generate data on the technical state of a structure at a given level of development of the software can be regarded as an additional information source with respect to the diagnostics conducted. Consideration is given to the need to improve the skills of the inspectors and found the engineering schools for diagnostics of welded metal structures.

В последние годы группой авторов [1–4] интенсивно разрабатывается идея дополнения и замены традиционной технической экспертизы аппаратно-программным комплексом (АПК). При этом необходимость такой замены обосновывается наличием противоречий между возможностью применения различных средств «методов контроля технического состояния конструкций и невозможностью объективной обоснованной оценки области допустимых значений результатов этого контроля» [1], которая сейчас основана на знаниях и доверии к эксперту, т. е. к личности, и носит субъективный характер. Для объективной оценки состояния конструкций предлагается дополнить существующую нормативно-техническую базу программными средствами в виде АПК, а на резервуарах установить датчики непрерывного и периодического действия. Такой АПК будет выполнять обработку сигналов датчиков и с использованием различных фундаментальных критериев выдавать объективный анализ состояния конструкций резервуаров. Вершиной комплекса является построение полномасштабной эволюционной модели конструкции, которая и будет наиболее полно описывать поведение конструкции в условиях эксплуатации. По утверждению авторов [1], такой АПК позволит глобально и объективно оценивать техническое состояние конструкций в текущий момент времени и предвидеть его развитие в будущем. При этом упускается, что разработку датчиков и АПК будут выполнять люди с определенным уровнем знаний. И достоверность конечного результата прямо будет зависеть от их работы, т. е. при проведении работы экспертом и при его замене АПК объективность будет определяться субъектом. Если эксперт опирается на данные физического контроля, хорошо апробированные многолетним опытом их применения, на результаты теоретических и экспериментальных

исследований, то во втором случае многое предстоит еще разработать, опробовать и доказать.

Выполним краткий анализ состояния ныне принятой экспертизы резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов. Рассматриваемые емкости являются объектами повышенной опасности. Резервуары вместимостью 10 тыс. м³ и более в соответствии с [5] являются объектами I класса ответственности. Поэтому их эксплуатация и технический надзор выполняются по специальным нормативным документам. На нефтеперерабатывающих заводах таким документом является специальная инструкция [6], а для резервуарных парков магистральных нефтепроводов — руководящий документ [7]. Действующие нормативные документы строго регламентируют все работы, связанные с обследованием, оценкой технического состояния, ремонтом и реконструкцией резервуаров. Здесь можно сожалением констатировать, что разработка аналогичных нормативов в Украине ведется очень медленно.

С учетом результатов обследования технического состояния составляется заключение, содержащее выводы и рекомендации о возможности и условиях дальнейшей эксплуатации резервуара, оценку его ремонтопригодности и приводятся основные технические решения по восстановлению работоспособности резервуара. На основании заключения разрабатывается проект для выполнения ремонта.

Как видим, в действующих нормативных документах выстроена строгая последовательность действий, без каких-либо противоречий. Особое внимание обращено на оценку качества сварных соединений стенки. Это связано с тем, что стенка резервуаров большой вместимости под действием давления хранимого продукта обладает громадной потенциальной энергией, состоящей из упругой энергии растяжения стенки и энергии давления хранимого продукта. При наличии в сварных соединениях такой стенки трещин или трещиноподобных дефектов, размеры которых со временем дос-



тигают критических значений, происходит мгновенная реализация этой энергии с образованием протяженных поверхностей разрушения [8]. Учитывая неуправляемость процесса такого разрушения, главное внимание необходимо уделять недопустимости его развития. Это может быть достигнуто путем полного исключения дефектов в сварных соединениях или обеспечения их работоспособности при наличии дефектов. Полностью исключить дефекты в реальной конструкции — задача часто недостижимая. Поэтому, как правило, устанавливаются размеры допустимых дефектов.

Оценка работоспособности стальной конструкции стенки резервуара при наличии дефектов в сварных соединениях является сложной и многогранной задачей. Инспектору на основании визуального осмотра сварного соединения, анализа результатов контроля его качества физическими методами, замеров угловых деформаций, данных о частоте и амплитуде малоциклового нагружения стенки, механических свойств материала стенки и сварного шва и других данных необходимо принять ответственное решение о работоспособности сварного соединения и конструкции в целом.

Попытка в работах [1–4] переложить оценку работоспособности сварной конструкции при нынешнем уровне теоретических и экспериментальных познаний на сигналы установленных датчиков и разрабатываемый авторами АПК не имеет на сегодня под собой необходимой научной базы. Принятые в АПК «фундаментальные критерии» оценки работоспособности сварной конструкции стенки и, в частности, сварных соединений, требуют более детальной расшифровки. Таких критериев нет в научной и действующей нормативной литературе. Достаточно обратиться к заслуживающему доверия энциклопедическому изданию по сварным конструкциям [9] под общей редакцией академика Б. Е. Патона. Анализ приведенного в этом издании материала убедительно показывает, что в ближайшем будущем критерием работоспособности резервуаров будет способность инспектора аккумулировать в себе и применять на практике имеющиеся на сегодня научные познания в данной области. Причем эти познания носят довольно обобщенный характер и в каждом конкретном случае требуется индивидуальный подход. При разработке новой базы технической диагностики в работах [1–4] не придают должного внимания оценке прочности сварных соединений при переменных нагрузках и основным факторам, оказывающим влияние на предел их выносливости, процессам разрушения стыковых сварных соединений с позиций механики разрушения и методам расчета прочности и долговечности. Результаты работ можно, в определенной степени, отнести к оценке прочности резервуаров при статическом нагружении.

Утверждение, что предлагаемая эволюционная математическая модель способна описывать процесс протекание всех взаимосвязанных физических явлений в объекте контроля и предвидеть их развитие в будущем не подтверждается приведенными примерами использования предлагаемого АПК.

Так, представленную в работе [1] на рис. РВС-10000 можно получить и путем отложения на концентрических окружностях кольцевых швов фактических отклонений стенки от вертикали [10]. Задача довольно простая и относится к статическому нагружению. Полученная таким образом форма стенки не может учитываться при определении эквивалентных кольцевых напряжений. Ограничения отклонений стенки при пустом резервуаре в большей степени связаны с обеспечением нормальной работы затвора и недопущения «прохлопывания» стенки при сливе — наливе хранимого продукта.

Отметим и ошибочность выводов авторов [1] о наличии сверхнормативных запасов по прочности стенки резервуаров РВС-75000 для ЛПДС «Мозырь», Республика Беларусь (проект ОАО «Мостсталь», Гданьск, Польша) и ЛПДС «Броды» (проект ОАО «УкрНИИПСК», г. Киев). Известно, что нормы [5, 11 и 12] распространяются на проектирование резервуаров вместимостью только до 50 тыс. м³ включительно. Поэтому указанные резервуары проектировались с учетом, по возможности, действующих норм. Методика расчета авторов [1] не является новой. Это один из вариантов определения кольцевых напряжений в стенке резервуара, подробно рассмотренный в [13], и результаты проведенных исследований используются в [5, п. 3.38] при расчете толщины поясов стенки. Как и в предыдущем примере, решение представлено в условиях статического нагружения.

Учитывая уникальность объектов, отсутствие необходимой статистики по механическим свойствам применяемых сталей и их сварным соединениям, а также большую ответственность за все принятые решения проектные организации решили увеличить расчетную толщину стенки нижних поясов на 5 мм. Это обычное решение и только с накоплением опыта проектирования, строительства и эксплуатации таких сооружений можно будет давать соответствующую оценку качества проекта. Никакие датчики на сегодня не могут заменить этот опыт.

Как видно, в представленных примерах работоспособность сварной конструкции определяется ее общей статической прочностью. Между тем, на сегодня вопросы статической прочности резервуаров достаточно изучены и многократно проверены на реальных объектах. В работах [1–4] авторы АПК видят стенку резервуаров как конструкцию, выточенную из цельной заготовки, не имеющей сварных соединений. В действительности это стенка оболочки, сваренная из более, чем ста отдельных листов.

Надежность рассматриваемых листовых сварных конструкций, особенно находящихся длительное время в эксплуатации, как правило, определяется местной прочностью. Такими локальными зонами часто бывают участки сварных соединений с дефектами. Трехосное напряженное состояние в дефектах не позволяет реализовываться высоким пластическим свойствам применяемых сталей и создает благоприятные условия для зарождения и развития хрупкого разрушения. Сочетание малоцик-



лового нагружения стенки резервуаров с наличием в вертикальных сварных соединениях смещения кромок, подрезов, непроваров, закалочных структур и других дефектов приводит к довольно интенсивному зарождению и развитию хрупких трещин. И именно их дальнейшее развитие будет определять, в большинстве случаев, работоспособность всей сварной конструкции резервуаров. Если приведенная полномасштабная эволюционная модель с установленными датчиками в состоянии описать все процессы, происходящие в таких дефектах в момент обследования конструкции и при их развитии во времени, то по полученным конкретным результатам можно будет дать реальную оценку предлагаемого АПК. Определенным примером может быть работа [14], в которой как частный случай показано, что с учетом свойств основного материала и сварного шва теоретически можно оценить работоспособность во времени конкретного стыкового сварного соединения с неполным проваром в условиях циклическом нагружении. Исходные данные в работе [14] получены экспериментальным путем.

Поиск методов диагностики сварных конструкций на основе информации, полученной от установленных датчиков, является довольно актуальной задачей. Наиболее ощутимы здесь достижения метода акустической эмиссии (АЭ). Метод АЭ позволяет обнаруживать развивающиеся дефекты и определять их координаты, оценивать степень опасности дефектов, измерять уровень напряжений. Однако и метод АЭ не нашел еще широкого применения, в том числе и при диагностике резервуаров. Объясняется это наличием еще ряда нерешиенных вопросов теории и практики, отсутствием систематизированной информации и рядом других причин. В частности, при диагностике резервуаров надо учитывать большие габариты конструкции, относительную удаленность нефтепарков от диспетчерских, открытость конструкции атмосферным воздействиям и т. д. [16].

Наш более чем тридцатилетний опыт работы в области надежности резервуарных конструкций показывает, что в последние годы в Украине наблюдается снижение технического уровня инспекторов — главных лиц, определяющих качество технической диагностики. Появление большого числа организаций с правом проведения экспертизы не способствовало повышению ее качества. В этом отношении поучителен опыт России, где идет процесс создания крупных технических школ диагностики на базе известных институтов АОЗТ ЦНИИПСК, АООТ ВНИИМонтажспецстрой, ЗАО «Трест Коксохиммонтаж», Уфимский нефтяной институт, Центр диагностики в Лиховицах и др. Это позволяет накапливать и анализировать сведения о техническом состоянии резервуаров, создавать инженерные школы со своими традициями и преемственностью и, в конечном итоге, растить кадры высококвалифицированных инспекторов.

Примером преимущества создания и работы инженерных школ на базе ведущих научных и проектных институтов является Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины и УкрНИИпроектстальконструкция им. В. Н. Шимановского.

Совместная работа специалистов высшей квалификации в области технологии сварки и прочности сварных конструкций позволяет выполнять всестороннюю экспертную оценку технического состоянию резервуаров и, что самое главное, разрабатывать новые технологии восстановления их работоспособности. Практика показывает, что 2–3 такие школы могут полностью обеспечить резервуарные парки Украины в проведении на высоком уровне их технической диагностики и разработку проектной документации для выполнения ремонтных работ.

Приведенные в настоящей статье рассуждения не отрицают того факта, что применение математического моделирования — вопрос актуальный и позволяет, в определенной степени, повышать достоверность оценки технического состояния сварной конструкции резервуара. Постоянное накопление статистических и экспериментальных данных, развитие технической базы в сочетании с увеличением получаемой в процессе диагностики информации, расширяет и перечень задач, решаемых различными программными комплексами. Однако на сегодня программные комплексы в оценке работоспособности сварных конструкций являются не более, чем хорошим вспомогательным инструментом. Главной фигурой в оценке работоспособности сварной конструкции резервуаров остается высококвалифицированный эксперт.

1. Радыш Ю. В., Киреев А. С. Совершенствование базы диагностики технического состояния и прогнозирования надежности резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов. — Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2000. — № 4. — С. 38–46.
2. Радыш Ю. В., Радыш В. Ю., Киреев А. С. и др. Аппаратно-программный комплекс нового поколения — альтернативы традициям технической экспертизы. — Друга україн. наук.-техн. конф. «Неруйн. контроль та техн. діагностика». — Дніропетровськ. 1997. — 222 с.
3. Барзилович Д. В., Радыш Ю. В., Киреев А. С. Інженерний захист за допомогою апаратно-программного комплексу діагностики та прогнозування технічного стану парку резервуарів для зберігання нафти. — Друга міжнар. наук.-практ. конф. «Інженерний захист територій об'єктів у звязку з розвитком небезпечних геологічних процесів». — Ялта, 2000. — 234 с.
4. Барзилович Д. В., Радыш Ю. В., Киреев А. С. Пути совершенствования нормативно-технической базы диагностики состояния и прогнозирования надежности резервуаров для хранения нефти. — Коллоквиум «Новые решения в проектировании и строительстве металлических резервуаров». — Одесса, 2000.
5. ВБН В.2.2-58.2-94. Резервуари вертикальні сталеві для зберігання нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93,3 кПа. — Київ, Держкомнафтогаз, 1994. — 98 с.
6. ИТН-93. Инструкция по техническому надзору, методам ревизий и отбраковки трубчатых печей, резервуаров, сосудов и аппаратов нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств. — Волгоград. — 1995. — 187 с.
7. РД 39-0147103-385-87. Руководящий документ. Правила технической эксплуатации резервуаров магистральных нефтепроводов. — ВНИИСПТнефть. — 1988. — 282 с.
8. Розенштейн И. М. Аварии и надежность стальных резервуаров. — М. Недра, 1995. — 235 с.
9. Винокуров В. А., Куркин С. А., Николаев Г. А. Сварные конструкции. Механика разрушения и критерии работоспособности / Под ред. Б. Е. Патона / М.: Машиностроение. — 1996. — 576 с.



10. Веревкин С. И., Ржавский Е. Л. Повышение надежности резервуаров, газгольдеров и их оборудования. — М.: Недра, — 1980. — 284 с.
11. СНиП II-23-81. Нормы проектирования. Стальные конструкции.
12. POLSKANORMA. PN-B-03210. Pazdziemik 1997. Konstrukcje stalowe. Zbiorcze walcowe pionowe na wykonanie.
13. Сафарян М. К. Металлические резервуары и газгольдеры. — М.: Недра, 1987. — 200 с.
14. Андрейків О. Є., Ліщинська М. В. Визначення залишкового ресурсу зварних конструкцій із щілиноподібними дефектами. — Автомат. сварка. — 2000. — № 2. — С. 10–13.
15. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций. — Киев, Изд-во метод. литературы и наглядных пособий ТК-78. — 2001. — 815 с.

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

Поступила в редакцию
20.03.2003

Международная конференция «КОНСТРУКЦИОННАЯ ПРОЧНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ И РЕСУРС ОБОРУДОВАНИЯ АЭС»

Киев, Украина, 20 – 22 мая 2003 г.

Конференция «РЕСУРС - 2003» состоится в Институте проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины при содействии и поддержке Национальной академии наук Украины, Минтопэнерго Украины, НАЭК «Энергоатом», Научного совета по проблеме «Механика деформируемого твердого тела», Научно-координационного и экспертного совета по вопросам ресурса и безопасной эксплуатации конструкций, сооружений и машин, Ассоциации «Надежность машин и сооружений».

В настоящее время Оргкомитет получил более 100 заявок на участие ведущих организаций Украины (Института проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАНУ, Института ядерных исследований НАНУ, Института электросварки им. Е. О. Патона НАНУ, Института технической механики НАН и НКА, Института черной металлургии им. З.И.Некрасова, Днепропетровского национального университета, Государственного научно-технического центра по ядерной и радиационной безопасности, Института сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля, ФМИ им. Г. В. Карпенко НАН Украины и др.), России (Института машиноведения РАН, Росэнергоатома, ЦНИИТМАШа, НИКИЭТА, ВНИИАЭСа, ФГУП ОКБ «Гидропресс», ЦНИИКМ «Прометей»), Азербайджана (Азербайджанского технического университета, Сумгаитского государственного университета), известных европейских организаций (Framatome ANP GmbH, Tractebel Energy Engineering, EC/JRC-IE, Tepnatom S.A, Nuclear Research Institute Rez near Prague), а также представителей атомных станций Украины.

ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦИИ

- критерии предельного состояния материалов при статическом, динамическом, мало- и многоцикловом нагружении;
- методы учета влияния технологических и эксплуатационных дефектов на предельное состояние материалов и элементов конструкций;
- оценка деградации структуры и свойств материалов в процессе эксплуатации;
- методы оценки конструкционной прочности;
- методы оценки ресурса, в том числе остаточного;
- экспертиза разрушения элементов конструкций;
- продление сроков эксплуатации оборудования атомной энергетики.

По вопросам проведения конференции просьба обращаться:

тел. 38 (044) 295-81-47, факс 38 (044) 296-16-84.
E-mail: info@ipp.adam.kiev.ua, conf2003@ukr.net
www.ipp.adam.kiev.ua

Украина, 01014, г. Киев, ул. Тимирязевская, 2.

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины
Оргкомитет Международной конференции «Ресурс – 2003»



ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МОМЕНТА ПОДНАЛАДКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПРИ ВОЗМОЖНЫХ ОТКЛОНЕНИЯХ ОТ ДОПУСТИМЫХ ЗНАЧЕНИЙ РАЗМЕРОВ ОБРАБАТЫВАЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ

В. М. НАГОРНЫЙ, К. А. ДЯДЮРА

Рассматриваются вопросы прогнозирования подналадки (настройки или замены отработавших свой ресурс режущих инструментов) технологических систем СПИД при возможных отклонениях от допустимых значений размеров обрабатываемых деталей.

The article deals with problems of jub-adjusting (adjusting or replacing of cutting tools that worked out their service life) of technological systems «System-Fitting-Tool-Piece» under possible deviations from the allowed values of dimensions of pieces being processed.

Основными факторами, определяющими качество изготовления деталей, является строгое выполнение разработанных технологических процессов и оперативный контроль и подналадка технологических систем при возможных отклонениях размеров детали от допустимых значений [1], которые приводятся в рабочих чертежах в виде допусков на размер детали.

Каждому методу обработки, осуществляющемуся на определенном оборудовании, присуща величина рассеивания размеров, характеризуемая полем рассеивания. Величина поля рассеивания определяется методом обработки, конструкцией, размером и состоянием станка (зависит от его точности и жесткости). Рассеивание размеров, связанное с методом обработки, не остается постоянным при обработке партии деталей, а изменяется в зависимости от состояния режущего лезвия инструмента и технологической системы СПИД.

В функции системы контроля, диагностирующей текущее состояние технологической системы, входит прогнозирование момента ее подналадки. Прогнозирование позволяет избежать незапланированных простоев оборудования, связанных с внезапным появлением брака из-за поломки инструмента или несвоевременной подналадки технологической системы СПИД [2].

Чаще всего подналадка связана с настройкой или заменой режущего инструмента как наиболее слабого элемента технологической системы [3]. Контроль и диагностирование инструмента представляет одну из наиболее важных задач автоматизированного производства. Точность прогнозирования зависит от эффективности выбора диагностического признака [4].

Состояние инструмента характеризуют различные критерии — диагностические признаки [5]. В тех случаях, когда главным считается влияние износа на точность обработки в качестве диагностического признака, характеризующего текущее состояние инструмента, принимают радиальный износ h_r (рис. 1, а). Если необходимо иметь информацию об

износе, после которого инструмент начинает разрушаться, в качестве диагностического признака принимают величину фаски на задней грани резца, лунки на передней грани и др.

При чистовой обработке деталей износ резцов происходит по их задней поверхности (величина фаски по задней грани h_3 (рис. 1, а), что приводит к отдалению вершины резца от центра вращения детали на величину радиального износа h_r , соответствующего увеличению радиуса обточки [6] (рис. 1, б).

Экспериментальные исследования по обточке заготовок из стали ШХ15 режущим инструментом марки Т15К6, проведенные на токарном станке 16К20, показали, что коэффициент линейной аппроксимации R^2 зависимости $h_r = f(h_3)$ примерно равен 1 (рис. 2).

Одним из путей определения величины износа является непосредственное измерение геометрических параметров режущей части инструмента, что возможно только до или после обработки детали. Но при этом, как правило, возникают трудности, связанные с размещением датчиков вблизи зоны резания, защищая их от сходящей стружки, невысокая точность измерения и др. Все это существенно осложняет автоматизацию процесса измерения.

В работе [7] отмечается, что рекомендуемые способы оценки радиального износа h_r по величине износа по задней грани h_3 следует считать недостоверными, поскольку, как следует из результатов исследований, приведенных в этой работе, износ в радиальном направлении развивается более стably, чем износ по задней грани. Кроме того, на увеличение диаметра детали D с увеличением

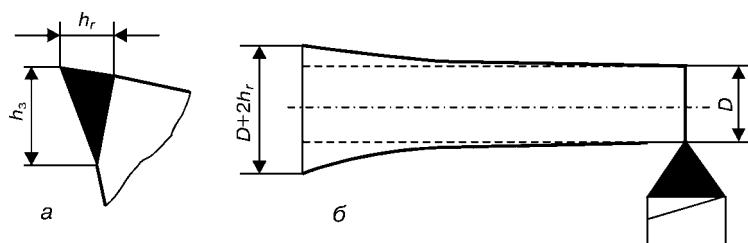


Рис. 1. Изменение размеров обрабатываемой детали при радиальном износе (D — диаметр детали)

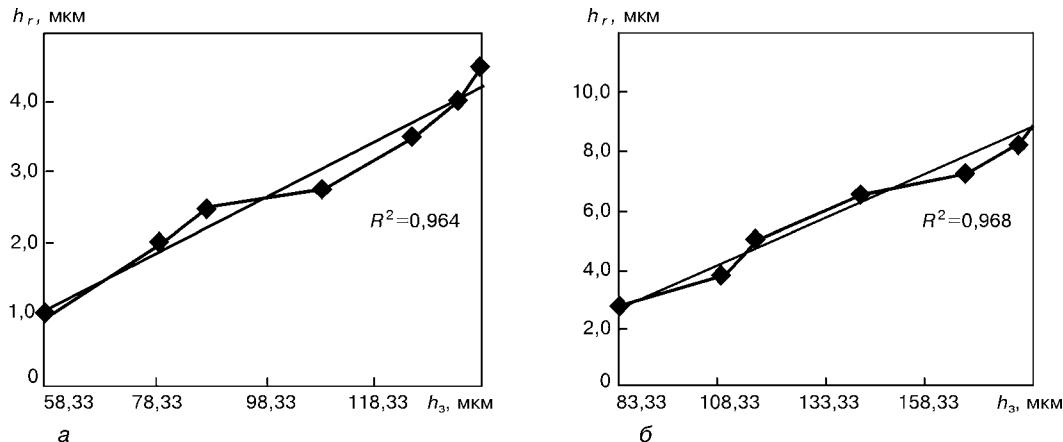


Рис. 2. Зависимости величины износа резца в радиальном направлении h_r от величины износа по задней поверхности h_3 для разных режимов резания: а — при $v = 125$ м/мин, $s = 0,15$ мм/об, $t = 0,2$ мм; б — при $v = 150$ м/мин, $s = 0,08$ мм/об, $t = 0,5$ мм (v — скорость резания; s — подача; t — глубина резания; \blacklozenge — экспериментальные точки)

величины радиального износа h_r ($D + 2h_r$) существенно сказывается тепловое расширение резца, упругие деформации системы СПИД, шероховатость обработанной поверхности и т.д. [5].

Кроме того [8], в автоматизированном производстве экономически выгодно пользоваться не оптимальным критерием износа инструмента, а критерием размерной стойкости, т.е. количеством деталей, изготовленных в переделах допуска без подналадки или замены инструмента, длиной пути резания, площадью обработанной поверхности, линейным относительным износом и т.п.

В других случаях пользуются косвенными методами измерения. Один из них — метод определения смещения режущей грани резца относительно обрабатываемой детали по результатам измерения приращения размера детали.

В данной работе прогнозирование момента подналадки технологической системы (замены режущего инструмента) предлагается проводить путем прогнозирования момента достижения предела допуска обрабатываемой детали. В качестве характеристики размерной стойкости взято количество проходов, выполняемых режущим инструментом. Один проход соответствует пути резания L , который определяется по формуле:

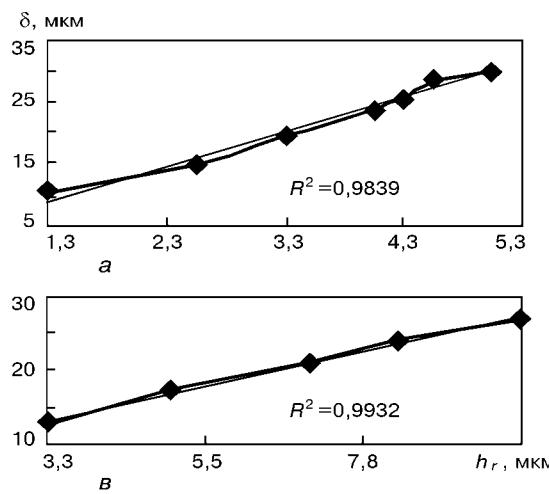


Рис. 3. Зависимости величины изменения диаметра детали от величин h_r и h_3 для разных режимов резания: а, б — $v = 150$ м/мин, $s = 0,15$ мм/об, $t = 0,5$ мм; в, г — $v = 150$ м/мин; $s = 0,08$ мм/об; $t = 0,5$ мм

$$L = \frac{\pi D l_g}{1000 S}, \quad (1)$$

где D — диаметр обрабатываемой детали; l_g — длина детали.

На рис. 3 и 4 приведены зависимости изменения погрешности диаметрального размера обработанной поверхности δ от изменения величины износа по задней поверхности h_3 и от изменения величины радиального износа h_r .

Диаметр обработанной детали $D = 110 h_6$. Допуск на размер в соответствии с квалитетом точности IT6 $TD = 30$ мкм. Погрешность диаметрального размера определяли по формуле:

$$\delta = D_{CP_i} - D_{CP_0}, \quad (2)$$

где D_{CP_0} , D_{CP_i} — соответственно значение диаметра обрабатываемой детали в начале и в конце прохода.

Из приведенных графиков видно, что погрешность диаметрального размера δ тесно связана с величиной износа по задней поверхности h_3 и величиной радиального износа h_r (коэффициент линейной аппроксимации $R^2 = 0,9532 \dots 0,9932$). Это позволяет во многих случаях трудоемкий и сложно реализуемый на практике процесс контроля величины износа.

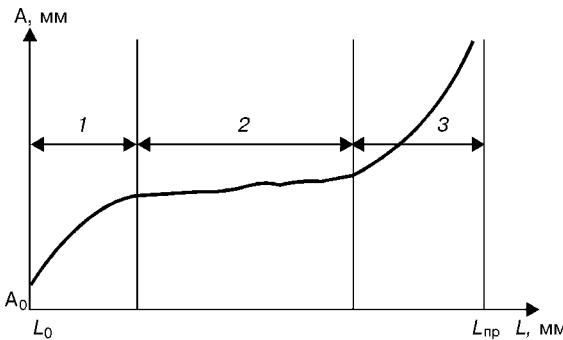


Рис. 4. Типичный график изменения диагностического признака в зависимости от пути резания: 1–3 – соответственно участки приработки, стационарной работы и подналадки

чины износа резца заменить измерением погрешности диаметрального размера детали.

Приведем результаты сравнительных исследований точности прогнозных оценок момента подналадки технологической системы, выполняемых на основе контроля за величиной износа резца (по задней поверхности h_z и радиального износа h_r) и погрешности диаметрального размера δ .

Исследования заключались в аппроксимации экспериментальных данных об износе и погрешности диаметрального размера детали аналитической зависимостью, описывающей изменение этих диагностических признаков в зависимости от пути резания (рис. 4) [9]:

$$A = A_0 + \alpha A_0 \left(\frac{L - L_0}{L_{\text{нр}} - L} \right)^n, \quad (3)$$

где A_0 – первоначальное значение величины диагностического признака; L_0 , L – путь резания соответственно на момент первоначального и текущего определения величины диагностического признака.

Параметры формулы α , n , $L_{\text{нр}}$ определялись путем поиска минимума следующего функционала:

$$U_0 = \sum_{i=1}^k \left\{ \frac{A_i}{A_0} - \left(1 + \alpha \left(\frac{L_i - L_0}{L_{\text{нр}} - L_i} \right)^n \right)^2 \right\}, \quad (4)$$

где A_i – текущее значение величины диагностического признака; L_i – соответствующий ему путь резания.

Момент подналадки технологической системы $L_{\text{подн}}$ определяли в результате решения уравнения (3) относительно пути резания при равенстве левой части уравнения предельно допустимому значению $A_{\text{нр}}$:

$$L_{\text{подн}} = \frac{\gamma L_{\text{нр}} + L_0}{1 + \gamma}, \quad (5)$$

$$\text{где } \gamma = \left(\frac{A_{\text{нр}} - A_0}{\alpha A_0} \right)^{1/n}.$$

В качестве предельно допустимого значения диагностического признака $A_{\text{нр}}$ принималась величина износа резца и погрешность диаметраль-

Таблица 1. Фактическое (I) и прогнозируемое (II) количество проходов до замены режущего инструмента, отработавшего свой ресурс (1 режим)

Наименование параметров		Значения параметров				
I	Количество проходов	1	2	3	4	5
		h_r , мм 0,0033	0,005	0,007	0,0083	0,001
II	h_z , мм δ , мм	0,096	0,116	0,150	0,179	0,187
		0,013	0,017	0,021	0,024	0,027
I	h_r , мм	–	–	3,66	4,23	4,79
		–	–	4,14	4,81	4,92
II	h_z , мм δ , мм	–	–	4,19	4,77	4,99
		–	–	–	–	–

ного размера детали, фиксируемые после последнего прохода L_K .

Погрешность прогнозирования оценивалась по величине Δ :

$$\Delta = \frac{L_{\text{подн}} - L_K}{L_K} \cdot 100 \%, \quad (6)$$

где L_K – фактическое значение пути резания, проходимого инструментом на последнем проходе; $L_{\text{подн}}$ – прогнозируемое значение пути резания до подналадки.

Исследования проводились для двух режимов резания: **1 режим**: $v = 150$ м/мин, $s = 0,08$ мм/об, $t = 0,5$ мм; **2 режим**: $v = 150$ м/мин, $s = 0,15$ мм/об, $t = 0,5$ мм.

Результаты исследований представлены в табл. 1 и 2.

Изменение погрешности прогнозирования момента подналадки технологической системы в зависимости от момента контроля величины диагностического признака представлена на рис. 5.

При этом момент контроля характеризовался безразмерной величиной \bar{L} , равной отношению в процентах текущего количества проходов L_i к предельно реализованному в эксперименте количеству проходов L_K :

$$\bar{L} = \frac{L_i}{L_K} \cdot 100 \%.$$

Анализ результатов, приведенных на рис. 5 и в табл. 1, 2 показывает, что начиная с момента определения диагностического признака, составляющего 50 % от предельно реализованного в опыте

Таблица 2. Фактическое (I) и прогнозируемое (II) количество проходов до замены режущего инструмента, отработавшего свой ресурс (2 режим)

Наименование параметров		Значения параметров						
I	Количество проходов	1	2	3	4	5	6	7
		h_r , мм 0,001	0,0025	0,0033	0,004	0,0043	0,0045	0,005
II	h_z , мм δ , мм	0,058	0,083	0,096	0,108	0,125	0,150	0,163
		0,010	0,015	0,0195	0,024	0,025	0,028	0,030
I	h_r , мм	–	–	3,63	5,20	6,29	6,96	6,86
		–	–	5,06	7,20	6,0	6,33	6,98
II	h_z , мм δ , мм	–	–	4,63	5,05	5,98	6,37	6,75
		–	–	–	–	–	–	–

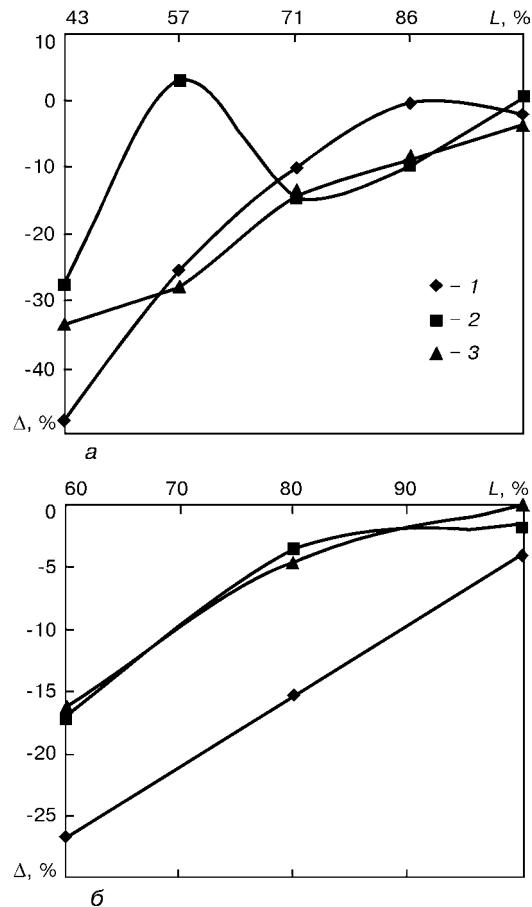


Рис. 5. Изменение погрешности прогнозирования подналадки в зависимости от момента контроля величины диагностических признаков для разных режимов резания: а — $v = 150 \text{ м/мин}$; $s = 0,15 \text{ мм/об}$; $t = 0,5 \text{ мм}$; б — $v = 150 \text{ м/мин}$; $s = 0,08 \text{ мм/об}$; $t = 0,5 \text{ мм}$; h_3 (1), h_r (2), δ (3)

те количества проходов L_K , погрешность прогнозирования становится меньше 20 %, причем прогнозируемое количество проходов меньше фактически реализованного. Погрешности прогнозирования, выполненного на основе износа, и погрешности размера детали соизмеримы.

В качестве примера на рис. 6 приведено соотношение между экспериментальными значениями диагностических признаков (погрешность размера δ) и аппроксимирующей кривой, рассчитанной для режима 2.

Выводы

Проведенные исследования показали, что процесс измерения величины износа резца можно заменить процессом контроля за погрешностью размера детали.

Сумський гос. ун-т

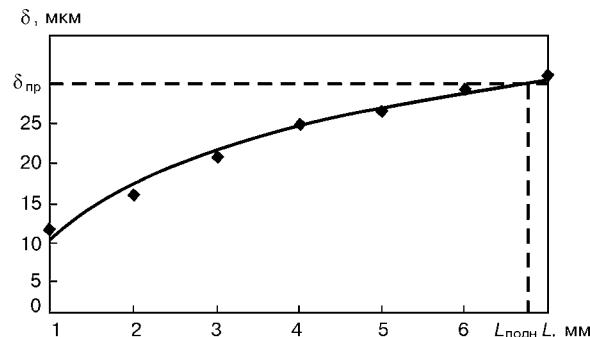


Рис. 6. Соотношение между фактическими значениями погрешности размера детали и аппроксимирующей кривой (штриховые линии — допустимые изменения диаметра)

Этот параметр является диагностическим признаком, который наиболее полно и комплексно характеризует общее текущее состояние технологической системы СПИД и с приемлемой погрешностью своевременно сигнализирует о необходимости проведения подналадок в системе.

На основании проведенных исследований разработана программа для ЭВМ, позволяющая прогнозировать момент подналадки технологической системы механической обработки при возможных отклонениях от допустимых значений размеров обрабатываемых деталей.

1. Юркевич В. В. Прогнозирование точности изготовления деталей. — Техника машиностроения. — 2000. — № 4 (26). — С. 46–52.
2. Нахапетян Е. Г. Контроль и диагностирование автоматического оборудования. — М: Наука, 1990. — 272 с.
3. Старков В. К. Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве. — М: Машиностроение, 1989. — 296 с.
4. Нагорный В. М., Залога В. А., Дядюра К. А. Методика прогнозирования работоспособности металлорежущего инструмента в условиях попутного тангенциального точения // Вісн. Сум. держ. ун-ту. — Суми: Вид-во Сум. держ. ун-ту, 2000. — № 19. — С. 88–95.
5. Базров Б. М. Технологические основы проектирования самоподстраивающихся станков. — М: Машиностроение, 1978. — 216 с.
6. Маталин А. А. Точность механической обработки и проектирование технологических процессов. — М: Машиностроение, 1970. — 320 с.
7. Юркевич В. В., Гурин В. Д. Точность обработки на токарных станках. — Техника машиностроения. — 2001. — № 4 (32). — С. 24–29.
8. Макаров А. Д. Оптимизация процессов резания. — М: Машиностроение, 1976. — 278 с.
9. Пат. 384338A. Украина, МКИ GO/M7/00. Способ визначення залишкового ресурсу роботи машини / В. М. Нагорний (UA); СумДУ; Заявл. 04.07.2000. Опубл. 15.05.2001, Бюл. № 4.

Поступила в редакцию
30.01.2003



ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ УСТАЛОСТНОГО СОСТОЯНИЯ И РЕСУРСА МЕТАЛЛОПРОДУКЦИИ НЕРАЗРУШАЮЩИМ МАГНИТНЫМ (КОЭРЦИТИМЕТРИЧЕСКИМ) МЕТОДОМ

Г. Я. БЕЗЛЮДЬКО

Приведены данные стендовых испытаний и результаты практической экспертизы различного оборудования в обоснование способности магнитной характеристики — коэрцитивной силы — контролировать степень развития усталостных явлений в металле. При оценке ресурса это может иметь самостоятельное значение в экспертизе бездефектного металла или дополнять данные дефектоскопии и других методов, улучшая ресурсный прогноз. На основе метода разработан государственный стандарт и серия магнитных структуроскопов, которые сертифицированы и внесены в государственный реестр.

The paper presents the data of bench testing and results of practical assessment of different equipment to substantiate the ability of the magnetic characteristic of coercive force to monitor the degree of development of fatigue phenomena in the metal. During evaluation of the fatigue life, this may be of importance separately in assessment of sound metal or may complement the data of flaw detection and other methods, improving the residual life prediction. The method was the basis to develop a state standard and a series of magnetic structure measuring units, which have been certified and entered into the state registry.

Состояние эксплуатируемого сейчас в пределах СНГ парка металлоконструкций и оборудования имеет ряд особенностей. Это и его сильная изношенность, поскольку новые мощности в эксплуатацию с 90-х годов практически не вводят, а только «добывают» наследие советских времен. Это и значительно меньший объем активно используемого оборудования, к тому же эксплуатация этого сохранившего дееспособность и предельно изношенного парка осложнена всеобщей финансовой стесненностью. Такие особенности, конечно, накладывают определенный отпечаток на экспертизу и диагностику металла, так как становится особенно важной правильность выбора: и не отправить на слом еще работоспособное оборудование, и не проглядеть момент, когда оно уже не может работать безаварийно. И здесь оценка «по состоянию» (а не по привычному сроку службы), как наиболее объективная и точная по своей сути должна возобладать в экспертизе над иными подходами, которые уже в своих основах всегда предполагают субъективизм в процессе принятия решений, определяя тем самым соответствующую точность итоговой экспертной оценки и построенного на ней диагностического прогноза.

Но самая своеобразная черта сложившейся реальности, очевидно, состоит в том, что при существенном снижении объемов «работающего» металла имеет место не спадающая в абсолютных показателях эксплуатационная аварийность. Если точнее, то в относительных цифрах аварийность неуклонно растет. Причем, это происходит на фоне растущих затрат на диагностические и надзорные мероприятия. Такое положение невозможно расценить иначе, как неэффективность применяемого в практике технического диагностирования «традиционного» набора методов для массового эксплуатационного контроля металлопродукции. И такой вывод представляется логичным. Ведь контингент специалистов в диагностике и экспертизе с 90-х годов практически не изменился, приборы контроля за этот

период только улучшились. Значит, проблема сосредоточена именно в методах контроля, которые оказались неэффективны применительно к металлопродукции, находящейся в такой степени повсеместной усталости.

Даже поверхностный анализ набора этих методов выявляет их ориентированность на дефектоскопические критерии оценки состояния металла. Более того, хотя дефектоскопия, как известно — это только составная часть диагностики (причем далеко не всегда самая весомая), нетрудно заметить, что в понимании многих экспертов — и не только рядовых — понятия «дефектоскопия» и «диагностика» прочно отождествлены. Причины этого скорее объективно-исторические, их обсуждение — это тема отдельной статьи. Справедливо ради следует только отметить, что подобное положение имеет место и в диагностике, проводимой в странах дальнего зарубежья. Однако результаты, представленные в данной работе, позволяют нам первыми выйти из такого положения.

Общеизвестно, что кроме редких особых случаев, усталостные дефекты металла, которые современная дефектоскопия способна обнаружить, возникают, как правило, на заключительной стадии срока службы данного изделия. Предшествующие этому в течение почти всего времени «жизни» металла процессы зарождения, развития и накопления усталостных изменений, происходящие, как известно, преимущественно в зонах концентрации нагрузений, до сих пор ни выявлять, ни измерять их количественно, не разрушая при этом сам объект контроля, было невозможно, так как не было инструмента для такого контроля. Макродефекты на этих стадиях в металле еще отсутствуют, а микродефекты структуры современная дефектоскопия всеми своими методами выявлять не способна, да это и не ее задача. Рентгеновский структурный анализ такую работу мог бы взять на себя, но этот метод доступен (и экономически приемлем) только в диагностике специальных объектов, но никак не в массовой экспертизе. Хотя дефектоскопия прак-

тически бессильна в оценке усталостных явлений структуры металла как чуждой для нее сфере применения, полезно будет отметить и такую особенность, что даже и в оценке дефектности металла, т. е. в основной области ее действия, методами дефектоскопии обеспечивается высокая надежность и воспроизводимость контроля только на стационарных дефектоскопических установках в условиях завода-изготовителя металлопродукции. Эксплуатационный же дефектоскопический контроль оборудования в массовой экспертизе выполняют ручными дефектоскопами. Отсюда и невысокая производительность и достоверность, а также плохая воспроизводимость, не говоря уже о возможностях документирования результатов контроля и ведения банка данных.

В излагаемом здесь магнитном коэрцитиметрическом контроле усталостного состояния металлопродукции преимущественная сфера действия метода — это зоны концентрации нагрузений, в которых эксплуатационная усталость развивается и накапливается опережающими темпами. При этом весьма существенно, что местонахождение этих зон на любых металлоконструкциях хорошо известно, так как оно логически предопределено самой конструкцией контролируемого изделия. В этом не может быть никакой случайности, поскольку все конструкции строятся по одним и тем же законам и принципам теоретической механики и сопротивления материалов, знакомым рядовому специалисту. Кроме того, размеры зон концентрации нагрузления велики и существенно превышают размеры единичного дефекта. В результате выявляются эти зоны надежно, без каких-либо поисковых сложностей.

И, как показали стендовые разрушающие испытания образцов, как подтвердила практика, если взять в качестве информационного параметра такую магнитную характеристику, как коэрцитивная сила металла, то ее приращение составит величину 200...300 % (для конструкционных сталей широкого применения), пока усталостные явления развиваются от состояния поставки (новый металл) до состояния предразрушения под действием приложенных нагрузок. В неразрушающем контроле этому просто нет аналогий. Все это дополняется простотой и дешевизной как самого процесса измерений, так и прибора для их реализации (магнитного структурископа-коэрцитиметра), так как время единичного замера приставным датчиком прибора имеет порядок десятка секунд, при этом не нужна особая подготовка поверхности контролируемого металла, допускается ее существенная шероховатость и кривизна, нет зависимости контроля от температуры окружающей среды. Получаемая оценка состояния металла является интегральной в толщине (глубине) слоя от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров в зависимости от типа используемого приставного датчика. Такая совокупность практических достоинств весьма эффективна и ей также трудно найти аналогию. И это все на неизведенном до сих пор поприще, ведь речь идет о количественном и качественном слежении за усталостными изменениями в металле в процессе

его эксплуатации, причем на уровне рядовой масштабной экспертизы и без отбора образцов металла, т. е. без разрушения объекта контроля. Создана практическая возможность контроля преддефектного состояния, что позволяет там, где это необходимо и целесообразно, перейти от вероятностной по своей сути практики обнаружения дефектов к детерминистской (лишенной фактора случайности) тактике их предупреждения. Опыт мировой диагностики на уровне массового контроля, по-видимому, пока не располагает такими возможностями.

Сейчас много и везде говорят об оценке «по состоянию» как предпочтительной в экспертизе текущего состояния металлопродукции. Однако механизма реализации этого подхода при экспертизе бездефектного металла, как оказалось при попытке перехода от рассуждений к практике, до последнего времени просто не существовало. Но именно бездефектным и является металл правильно сконструированного и изготовленного изделия (имеются в виду не металлургические, а эксплуатационные дефекты) в течение большей части его срока службы. Поэтому, видимо, и сложилось представление о диагностике как о дефектоскопической дисциплине, что отсутствовали методы и приборы слежения за бездефектной деградацией металла под действием эксплуатационных факторов. Приведенные ниже результаты эту неопределенность позволяют реально устраниить. Практическая их проработанность весьма высока. Имеется межгосударственный СНГ-стандарт ГОСТ 30415-96, который в совокупности с Изменением № 1 к нему регламентирует магнитный контроль механических свойств и ресурса металлопродукции как на стадии производства, так и на всех этапах эксплуатации.

Госгортехнадзором России уже с 1997 г. разрешено техническое диагностирование всех типов грузоподъемных кранов и лифтов этим методом с применением специально разработанных для этого в Харькове фирмой «Специальные Научные Разработки» магнитных структурископов-коэрцитиметров серии КРМ-Ц, которые сертифицированы и внесены в Госреестр России. В этом году аналогичный порядок распространен в России и на диагностику сосудов давления. При этом следует уточнить, что основная часть необходимых стендовых испытаний образцов сталей и сосудов давления (кислородных баллонов) выполнена специалистами в Харькове (ОАО «УкрНИИхиммаш» и фирмой «Специальные Научные Разработки»).

Об официальном признании метода в Украине сказать нечего. Объемы практической экспертизы этим методом здесь невелики, она носит инициативный характер и держится на личном энтузиазме отдельных экспертов. Видимо, статистика аварийности при эксплуатации украинского парка металлопродукции не такая тревожная, как в России и остальном мире.

Конкретизируя изложенные выше рассуждения, приведем некоторые практические результаты и данные стендовых испытаний.

На рис. 1 приведены данные стендовых испытаний на растяжение образцов конструкционных сталей широкого применения — Ст3, 20, 09Г2С.

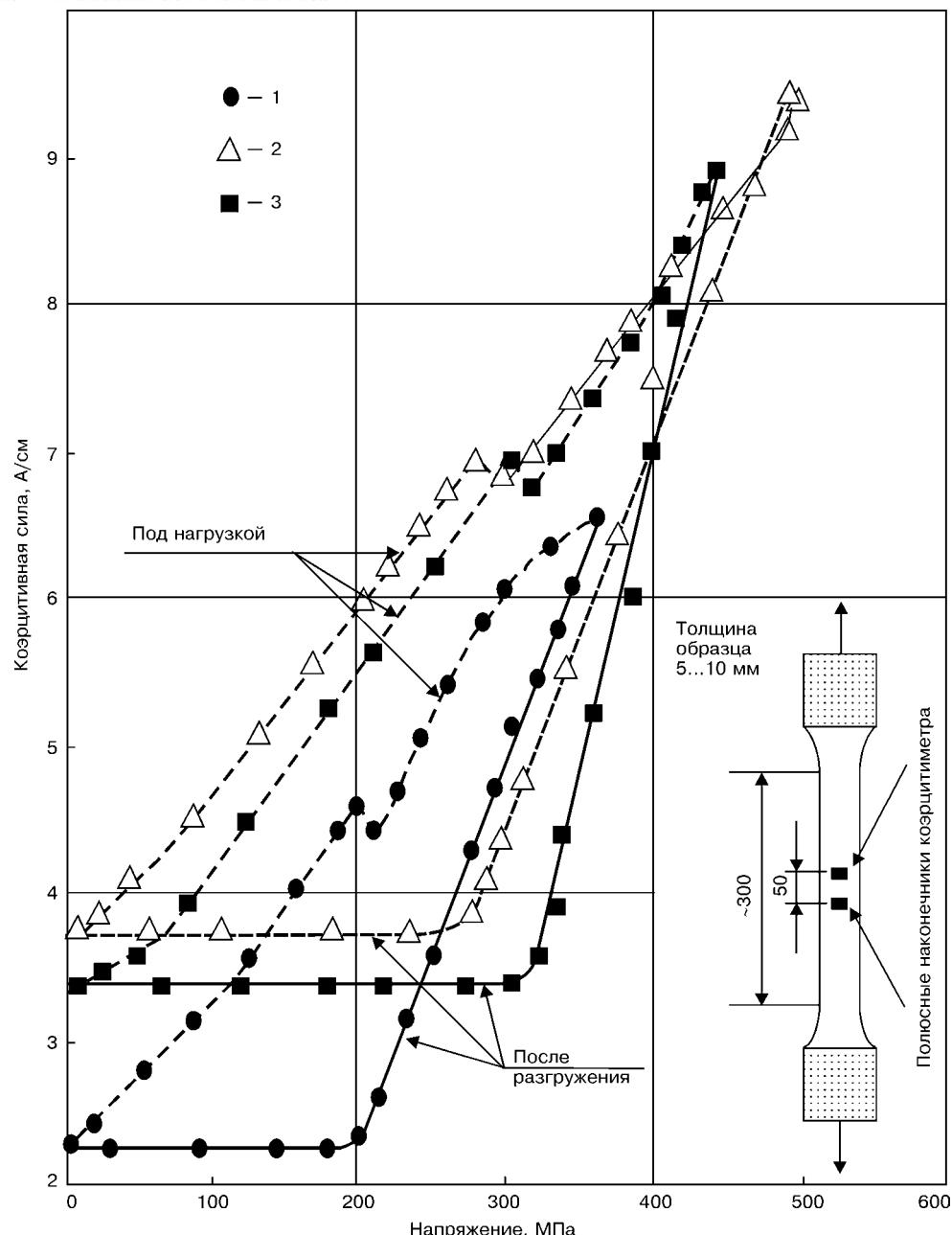


Рис. 1. Магнитный (коэрцитиметрический) контроль плоских образцов из сталей Ст3 (1), 20 (2), 09Г2С (3) при испытании на растяжение с регистрацией показаний коэрцитиметра под нагрузкой и после разгрузки на каждой ступени нагружения

Нагружение выполнялось ступенчато, с полной разгрузкой после каждого приращения. Измерения коэрцитивной силы образца H_c проводили на каждой ступени под нагрузкой и после разгрузки. При ступенчатом нагружении и измерении коэрцитивной силы H_c после разгрузки образца, когда магнитный параметр реагирует только на остаточные внутренние напряжения и деформации, в упругой области величина H_c остается постоянной и равна исходному значению H_{c_0} (состояние поставки). При достижении внешней приложенной нагрузкой предела текучести σ_t величина H_c возрастает до значения H_c^T и далее при увеличении нагрузки растет по линейному закону до значения H_c^B , соответствующего нагрузке на пределе прочности σ_b . При непрерывном растяжении образцов

(в режиме одноосного нагружения) показания коэрцитиметра растут пропорционально приложенному напряжению вплоть до предела текучести σ_t . Резкое отличие текущих значений H_c от H_c^0 в разгруженном состоянии — надежное свидетельство появления пластической деформации контролируемого изделия. Совместная оценка состояния образцов с позиций статического нагружения и с позиции классификации режимов нагружения дает возможность трактовать показания коэрцитиметра при нагрузках $\sigma < \sigma_{0,2}$ как идентифицирующее «легкий» режим (металл работает в упругой области), при $\sigma \leq \sigma_{0,2}$ — «умеренный» режим, область упруго-пластических деформаций, при $\sigma > \sigma_{0,2}$ — «тяжелый» режим эксплуатации. При переходе от стендовых испытаний образцов к ре-

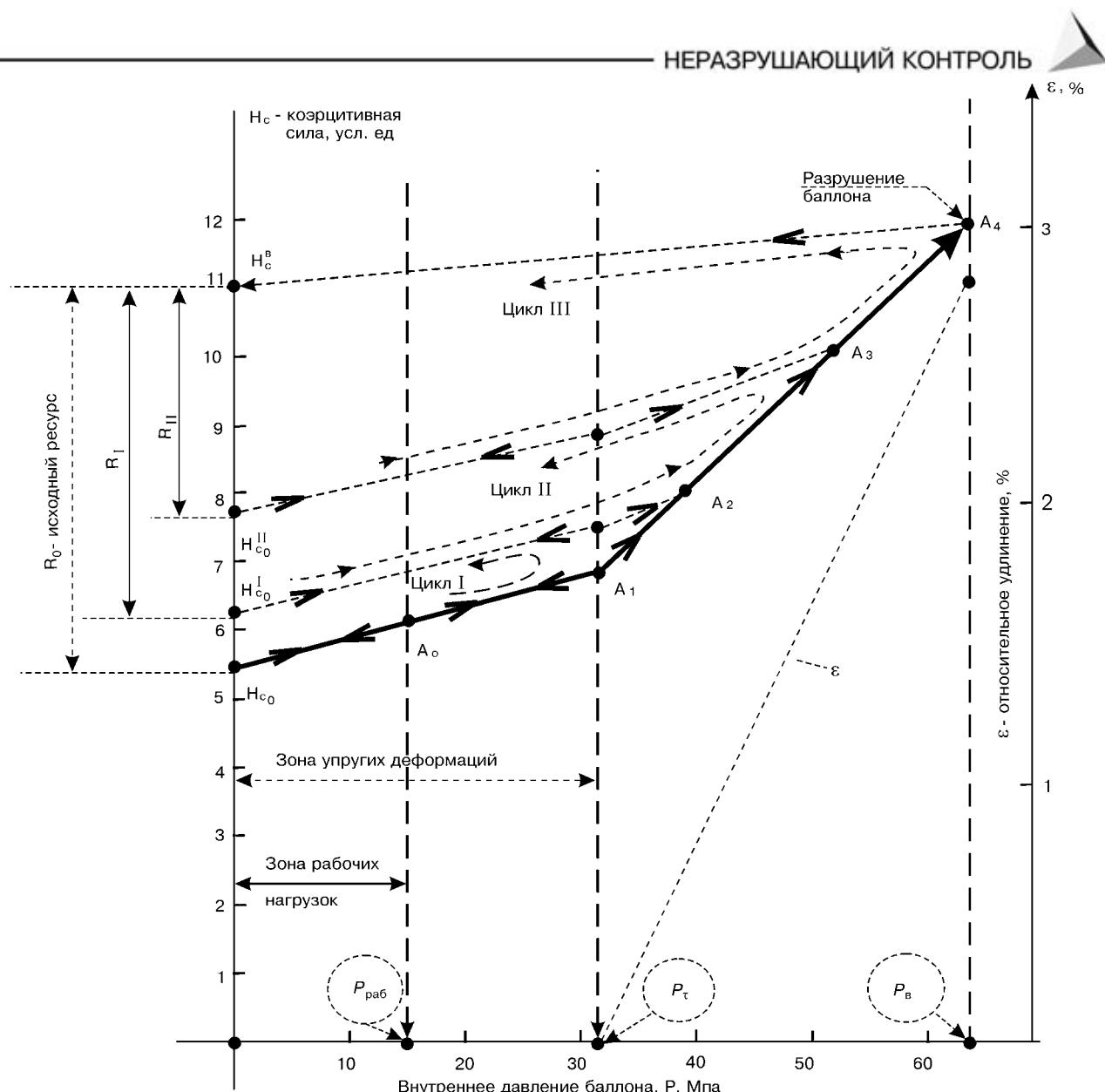


Рис. 2. Магнитный (коэрцитиметрический) контроль при разрушающих испытаниях внутренним давлением промышленных баллонов для газа из стали Дс: $P_{раб}$ — рабочее давление; P_τ , P_b — давление на пределе текучести, прочности; I, II, III — циклы нагружения

альным металлоконструкциям надо провести анализ распределения значений H_c в зонах нагрузления (или равномерно распределить точки контроля по площади изделия, если найти зоны концентрации затруднительно), выявить области с максимальны-

ми значениями H_c , сравнить их с $H_{c_{max}}$, H_c^T и H_c^B . Эти значения, как нетрудно заметить, являются характерными константами для каждой марки стали. Сопоставление средних значений H_c со значениями $H_{c_{max}}$ и H_c^B позволяет сделать вывод о текущем состоянии изделия и его реальном остаточном ресурсе.

Здесь уместно добавить, что если провести циклические (режим малоцикловой усталости) стендовые разрушающие испытания образцов этих же сталей, то окажется, что полученные значения H_{c_0} , H_c^T и H_c^B не отличаются от тех, что были определены статическими нагрузлениями. Это является своеобразным следствием закона сохранения энергии или его подтверждением методами неразрушающего контроля.

В таблице приведены характерные значения коэрцитивной силы для наиболее применяемых марок сталей. Они дают необходимую основу для экспер-

Магнитные и механические свойства листов толщиной 5...20 мм из конструкционных сталей

Марка стали	Механические свойства		Магнитные свойства, H_c , A/cm				
	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	H_{c_0}	H_c^T	H_c^B	$H_c^{уст.}$
Ст3	350	210	22	2,5	6,0	6,0	5,8
09Г2С	450	310	20	4,0	9,5	9,5	9,5
10ХСНД	540	400	19	5,0	14,5	14,5	13,5
Ст20	420	260	24	4,5	13,5	13,5	13
Дс	600...650	350...400	15	5,0...6,8,0...8,10,0...19,5...10	—	—	—
17Г1С	520	350	23	4,0	10,0	14,0	14,0

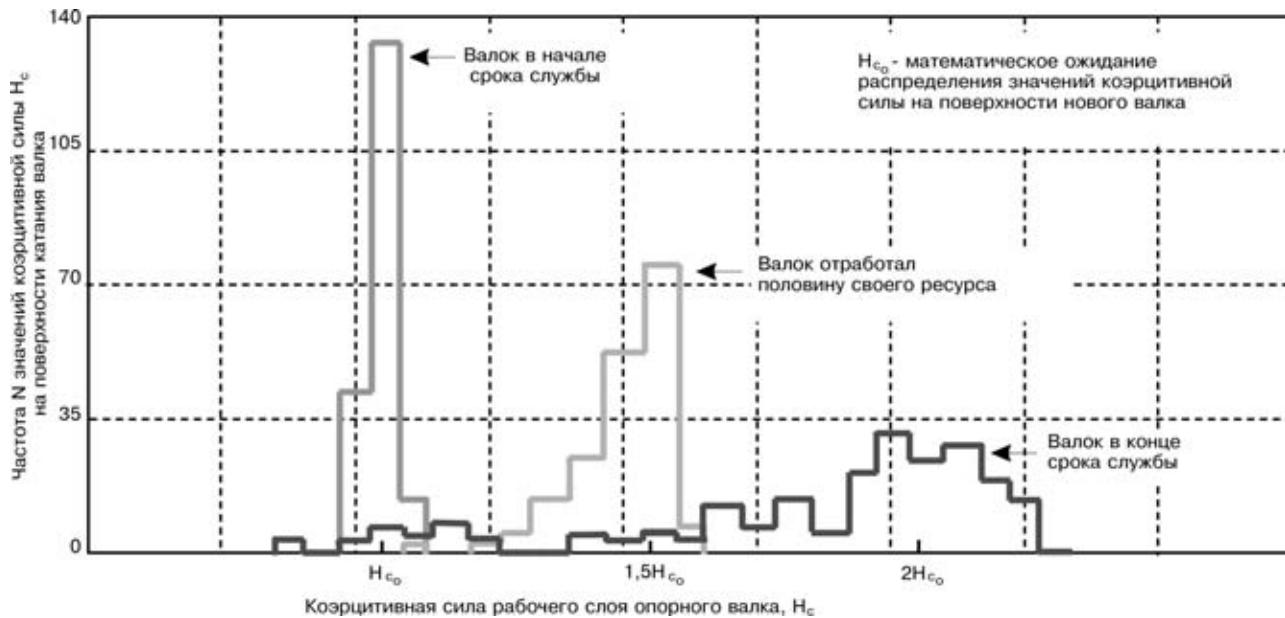


Рис. 3. Распределение значений коэрцитивной силы по поверхности катания опорного прокатного валка из стали 75ХМФ в зависимости от объема прокатанной продукции (отработанного ресурса)

тизы большинства разновидностей эксплуатируемой металлопродукции. Сталь Дс здесь представляет отраслевую маркировку разновидности металла, используемого только в производстве промышленных газовых баллонов (по ГОСТ 949 для кислорода и т.д.). На примере стендовых разрушающих испытаний таких баллонов как наиболее распространенных сосудов давления, переходим от исследования поведения коэрцитивной силы на образцах металла к реальным изделиям. На рис. 2 приведена обобщенная характеристика (точки H_{c_0} , $A_0 - A_4$) нагружения образца металла из стали Дс, начиная от состояния поставки (H_{c_0}) до состояния разрушения (A_4). Испытания баллона вместо образца дают аналогичную характеристику. Видно, что разрушить изделие можно однократным непрерывным нарастающим нагружением или многократными циклами с заданной или нарастающей амплитудой. На рис. 2 таких нарастающих циклов условно показано три. При этом показательно, что коэрцитивная сила металла оболочки является надежным свидетелем даже однократной перегрузки баллона давлением сверх предела текучести, а также наглядным мерилом степени исчерпания исходного ресурса R_0 (значения R_I и R_H на соответствующих циклах нагружения).

Из экспериментальных данных на рис. 1 и 2 убедительно следует, что задача поиска эффективного параметра контроля усталостного состояния решена, так как в ходе «продвижения» испытываемого металла от состояния поставки до предразрушения его коэрцитивная сила возрастает в 2...3 раза от величины H_{c_0} до H_{c^T} . Так, время контроля одного баллона ручным коэрцитиметром на основании данных таблицы и рис. 2 в практике экспертизы составляет около трех минут.

Используя результаты, показанные на рис. 1, 2 и в таблице, проведено диагностирование в системе Госгортехнадзора России нескольких тысяч

мостовых кранов и около тысячи кислородных баллонов и лифтов. Некоторые краны наблюдаются таким образом уже около восьми лет. При этом хорошо видно, что зачастую они изнашиваются больше от собственного веса, чем от выполняемой ими работы. Из диагностики баллонов и их стендовых испытаний неопровергнутое следует, что у качественно изготовленного и правильно эксплуатируемого баллона нет нормативного срока службы в разумном понимании этого термина ввиду очень большого конструктивного запаса, исчерпать который при паспортных нагрузках практически невозможно.

Опыт диагностики коэрцитиметрией действующего оборудования представлен на рис. 3. Это эксплуатационный контроль опорных прокатных валков из стали 75ХМФ на листопрокатном стане холодной прокатки. Такое изделие является примером, когда эксплуатация дефектного оборудования принципиально недопустима. Трешина рабочего слоя при высоких скоростях вращения многотонного цилиндра и при высоких локальных усилиях обжатия приводит к мгновенному разрушению вала, полному или частичному. Материальные последствия аварии здесь — наглядное доказательство торжества концепции, что аварию легче и дешевле упреждать, чем ликвидировать ее последствия. И пока только коэрцитиметрия поверхности вала до и после каждой установки его в рабочую клеть (в процессе «жизни» валок претерпевает несколько таких переустановок для его периодического восстановления и ремонта) позволяет выявить зарождение концентраторов в глубине рабочего слоя, под его поверхностью. Такой концентратор разряжается трещиной, которая развивается мгновенно и лавинообразно. Ее поиск методами дефектоскопии в ремонтный период — бессмысленная работа. Необходимо выявлять ее предвестника, который созревает долго, несколько загрузочных кампаний. А область локально повышенных остаточных напря-

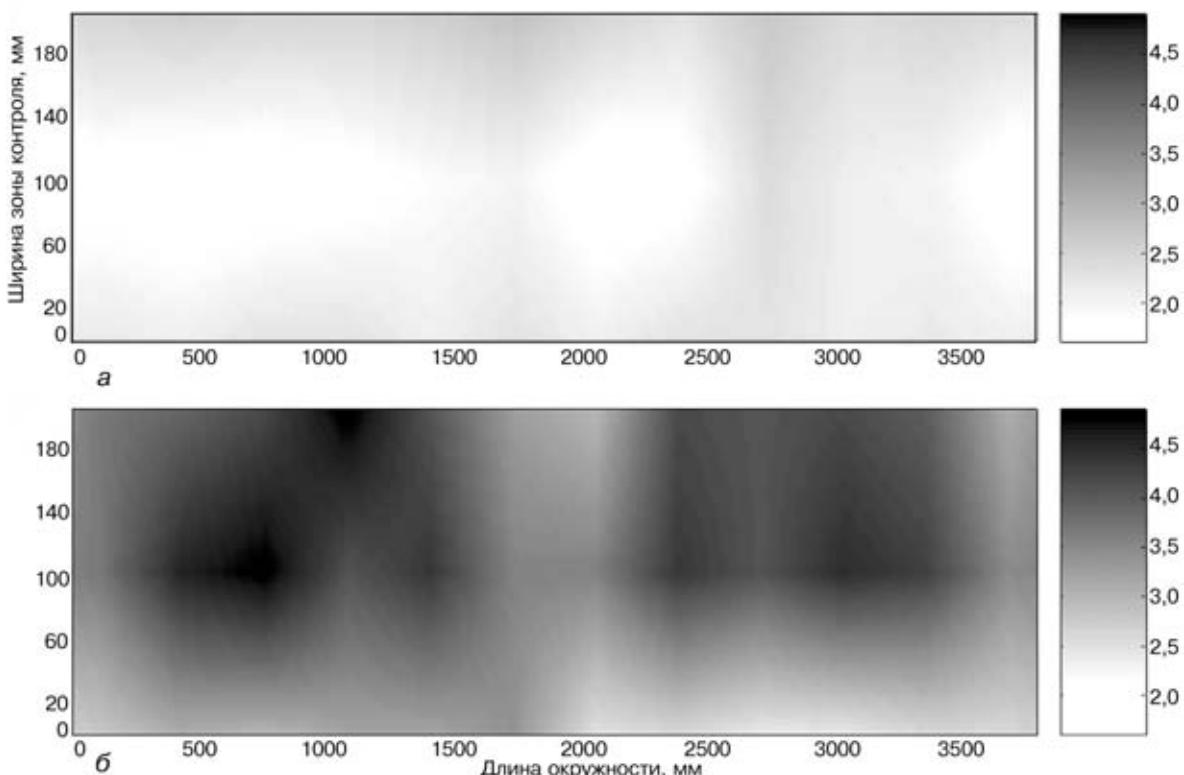


Рис. 4. Магнитный (коэрцитиметрический) контроль сварных швов паропровода: *а* — шов находится в режиме надежной эксплуатации; *б* — шов в критическом режиме

жений, в которой будущий дефект созревает, велика по своим размерам и легко обнаруживается ручным коэрцитиметрическим контролем поверхности катания. Время контроля одного валка диаметром около 1,5 м и длиной порядка 3 м занимает 40 мин. Обобщенная диаграмма такого контроля получена из выборки порядка 100 валков и показана на рис. 3. Из нее видно, что средняя величина H_c поверхности катания растет (для стали 75ХМФ) в процессе всей жизни валка примерно вдвое. Зная граничные значения H_c , легко прогнозировать ресурс конкретного валка в процессе его работы. Анализируя распределение значений H_c по поверхности катания для нового изделия, наблюдая, как это распределение меняется в процессе работы, можно уверенно оценить качество нового валка, качество его ремонта, правильность его эксплуатации прокатчиками. Все это сейчас позволяет осуществить только коэрцитиметрия. До сих пор обезличка ответственности в этих моментах эксплуатации приводит к тому, что среднестатистическим валком в странах СНГ производится почти вдвое меньше металла, чем аналогичным в промышленности развитых стран.

При обследовании валков понадобилось проанализировать распределение значений коэрцитивной силы на больших площадях контроля, что дало возможность получить эффективный способ представления результатов обследования, который благодаря наглядности очень ускорил решение задачи коэрцитиметрического контроля состояния сварных швов трубопроводов. Здесь эффективность конечного результата, наверное, наполовину обеспечивается удачным выбором параметра контроля, а

остальное — способом отображения данных. На рис. 4, *а* показан пример обследования сварных швов на паропроводах, где труба с толщиной стенки 70 мм и диаметром около 800 мм работает при давлении 15 МПа. Представлены два наиболее характерных примера швов, показывающие возможности метода особенно наглядно. Срок службы обоих швов порядка 15 лет. При обследовании выполнены измерения H_c на самих кольцевых швах вручную с определенным шагом по длине окружности каждого шва (ширина шва — около 100 мм). Такие же измерения выполнены в зонах термовлияния по обе стороны от каждого шва. Полученная таблица значений затем обработана специальной ЭВМ-программой. Результат представлен в виде геометрической развертки шва и околосшовной зоны, на которой интенсивностью закраски черным цветом показана степень продвижения металла шва и околосшовной зоны от исходного состояния до предразрушения, т. е. от значения H_{c_0} для стали, из которой изготовлена труба и сварен шов, до значения H_c^B . На рис. 4, *а* показан шов, у которого это продвижение практически отсутствует благодаря тому, что он был правильно сварен, а отрезок трубопровода, на котором этот шов выполнен, был верно сконструирован и смонтирован. Коэрцитиметрия не отметила особых изменений состояния металла в течение этих лет эксплуатации, что свидетельствует также о существенном конструктивном запасе прочности, так как нагрузки внутренним рабочим давлением практически не изменили свойства металла трубы, шва и околосшовной зоны. Более того, на основании магнитных характеристик



можно судить о шве и о трубе как об одном целом. Иная ситуация показана на рис. 4, б. Здесь в течение срока службы уже произошла авария в результате появления сквозной трещины, развившейся из корневой зоны шва на поверхность. Причем, это имело место вскоре после регламентной дефектоскопии. Зона ремонта шва через несколько лет, как видно, снова находится в состоянии предразрушения с точки зрения коэрцитиметрии. Рядом с ней созревает еще один концентратор такой же степени опасности. На основании рис. 4, кроме количественного и качественного отображения состояния шва можно предположить причину разного состояния этих двух швов, работающих в одинаковых условиях, изготовленных из одного металла, сваренных одним специалистом и на одинаковом оборудовании. Эта причина — конструктивные особенности участков трубопровода, в которых эти швы «работают». Один из них оказался в зоне конструктивного концентратора напряжений. Часть шва попала под действие нагрузок, превышающих предел текучести его металла. Скорость усталостной деградации в двух его зонах, хорошо выделенных коэрцитиметрией на рис. 4, б, существенно больше, чем в остальном шве. Это приводит

к ускоренному исчерпанию в этих зонах исходного запаса пластичности и, как результат, к опережающему образованию усталостных трещин. Понятно, что дефектоскопия здесь только констатирует факт отсутствия или наличия дефекта шва.

В заключение как логический итог вполне правомерен вывод, что неразрушающий магнитный (коэрцитиметрический) контроль металлоконструкций на всех стадиях ее эксплуатации позволяет количественно и качественно оценить степень развития и накопления усталостных явлений в металле, и, тем самым, повысить точность диагностического прогноза остаточного ресурса. Это новая возможность для рядового эксперта и для массового контроля. Метод хорошо проработан нормативно, успешно и широко испытан практикой и экспертизой на многих типах конструкций и оборудования. Магнитные структуроскопы серии КРМ-Ц для его реализации просты в работе и доступны по цене широкому пользователю.

Данная работа представляет результаты, полученные группой специалистов Украины и России. Контр. тел.: (0572) 64-36-13, e-mail: bezlyudko@yahoo.com

НПФ «Специальные Научные Разработки»,
г. Харьков

Поступила в редакцию
14.04.2003

SKF Condition Monitoring



Портативные Приборы SKF MicroVibe™

MicroVibe™ — новейший портативный вибрационно-измерительный прибор SKF, позволяющий проводить современный анализ состояния роторных машин. Благодаря своим измерительным качествам, низкой стоимости, компактности, маленькой массе, MicroVibe™ является первым вибрационно-измерительным прибором, который совместим с Palm PC (карманным компьютером). Прибор оснащен всеми необходимыми функциями, включая выбираемую пользователем систему единиц измерения (Английская, Метрическая); набор инструментов измерения: Общие Уровни Вибрации, Временная Волна, Спектры БПФ. В прибор также заложены критерии сравнения получаемых данных с допустимыми уровнями вибрации согласно стандартам ISO.



SKF Reliability Systems Представительство SKF Eurotrade AB в Украине
Украина 01033, г. Киев, ул. Гайдара, 22.
тел. +38(044) 2302889, 2302890; факс +38(044) 2302140
E-mail: SKF.ukraine@skf.com; www.skfcm.com; www.reliability.com

К ВОПРОСУ О ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ЭКВИВАЛЕНТНОГО ДИАМЕТРА ДЕФЕКТА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АРД-ДИАГРАММ

Г. Г. ЛУЦЕНКО

Исследуется влияние погрешностей исходных данных, полученных при непосредственном измерении, на точность определения эквивалентного диаметра дефекта при использовании прямых пьезоэлектрических преобразователей и АРД-диаграмм Крауткремера. Исследование базируется на численном анализе дифференциальных свойств АРД-диаграмм.

Studied was the effect of errors in the source data generated by direct measurement on the accuracy of determination of the equivalent diameter of a defect in the case of using direct piezo-electric transducers and the Krautkremer isothermal dendrite transformation diagrams. The studies were based on a numerical analysis of differential properties and the isothermal dendrite transformation diagrams.

Использование АРД-диаграмм (в качестве одного из приемов дефектометрии) описано в [1–3], а также в ряде нормативных документов. Эффективность использования АРД-диаграмм основана на том, что изменяющиеся от эксперимента к эксперименту параметры среды (скорость продольных волн) и пьезоэлектрического преобразователя (рабочая частота, диаметр или площадь излучающей поверхности) входят в обобщенные (нормированные) переменные g , x , от которых зависит амплитуда эхо-сигнала A , выраженная в децибеллах. Сама же функция $A(g, x)$, где $g = d/D$ — отношение диаметров дефекта и пьезопреобразователя (ПЭП) и $x = \lg(r/R)$ — логарифм отношения расстояния по лучу к длине ближней зоны ($R = D^2f/4c$), остается неизменной при вариации параметров измерительного эксперимента. При измерении исходных для расчета данных, как-то: амплитуды, частоты, расстояния, скорости звука неизбежны погрешности, приводящие в итоге к ошибке в определении эквивалентного диаметра дефекта. Ясно, что величина результирующей ошибки зависит от свойств функции $A(g, x)$ (или от дифференциальных свойств соответствующей ей поверхности). Изучение этих свойств для различных областей аргументов, соответствующих ближней, дальней и промежуточной зонам в поле ПЭП, а также оценка величины погрешности в зависимости от допусков на точность измерения исходных данных является предметом данной работы. При этом мы будем основываться на АРД-диаграммах Крауткремера, применяя для их исследования как аналитические, так и численные методы.

Вычисление погрешности измерения эквивалентного диаметра дефекта. Рассмотрим более детально процедуру измерения. Основному измерению предшествует калибровочный эксперимент, устраняющий неопределенность сквозного коэффициента передачи электроакустического тракта. Будем предполагать, что калибровка проводится по величине донного эхо-сигнала с использованием соответствующей кривой Крауткремера $A_b(x)$. Тогда нетрудно получить следующее выражение для приведенной амплитуды A эхо-сигнала от дефекта через непосредственно измеренные амплитуды эхосигналов — донного A_{b1} и от дефекта A_1 :

$$A = A_1 - (A_{b1} - A_b(x_H)) + 2(\alpha r - \alpha_1 H)20\lg(e). \quad (1)$$

Амплитуда A_b определяется по донной кривой АРД-диаграмм Крауткремера при $x = x_H = 4c_1H/D^2f$. Здесь мы рассматриваем общий случай, когда параметры материала образца при калибровке (скорость звука c_1 и коэффициент поглощения α_1) отличаются от параметров материала детали (c , α).

По приведенной амплитуде A и рассчитанному обобщенному расстоянию $x = \lg(4cr/D^2f)$ находят эквивалентный диаметр дефекта. При этом в явной или неявной форме используется зависимость, обратная функции АРД-диаграмм: $g(A, x)$, так что

$$d = Dg(A, x). \quad (2)$$

Остановимся на способах задания зависимостей $A(g, x)$ и $g(A, x)$. Как правило, зависимость $A(g, x)$ задана в виде набора графиков, параметром которых является аргумент g , принимающий значения из дискретного набора в интервале от 0,05 до 1. С ростом обобщенного расстояния графики асимптотически переходят в прямые линии, которые соответствуют закону обратных квадратов для амплитуд эхосигналов в дальней зоне в среде без потерь. Граница дальней зоны весьма условна. С достаточной для практики точностью можно принять в качестве граничного значение $x = 1(r/R = 10)$. В области $x > 1$ (и в указанном диапазоне аргумента g) справедливы энергетические соображения, в соответствии с которыми амплитуда эхосигнала пропорциональна площади отражателя (или квадрату диаметра). Из этого следует, что в координатах (u, x) , где $u = 40 \lg(g)$, поверхность $A(u, x)$ в указанных пределах представляет собою плоскость и определяется по формуле:

$$A = B + u - 40(x - 1). \quad (3)$$

Константа B выбирается так, чтобы согласовать эту плоскость со значениями АРД-диаграмм при $x = 1$ (или при другом значении, которое принято в качестве границы дальней зоны). Соответственно, обратная зависимость определяется простыми соотношениями:

$$u = A + 40(x - 1) - B, g = 10^{u/40}. \quad (4)$$



АРД-диаграмма донного сигнала в рассматриваемой области представляет собой прямую линию вида:

$$A_b(x) = B_b - 20(x - 1).$$

При уменьшении x (в области $x < 1$) линейность связи приведенной амплитуды с аргументами u , x утрачивается, однако зависимость $A(u)$ при любом $x = \text{const}$ остается монотонной, лишь постепенно отклоняясь от линейной. Это позволяет подобрать для каждого значения $x = \text{const}$ полином $P_1(u)$, достаточно точно описывающий зависимость $A(u)$, и полином $P_2(A)$, описывающий обратную зависимость $u(A)$. Таким образом, АРД-диаграммы $A(u, x)$ и обратные АРД-диаграммы $u(A, x)$ можно описать таблицами полиномиальных коэффициентов на некотором дискретном наборе значений обобщенного расстояния x . Такое представление обратных АРД-диаграмм оказалось удобным для вычисления погрешности измерения эквивалентного диаметра отражателя.

Остановимся на факторах, обусловливающих эту погрешность. Исходные величины, необходимые для расчета эквивалентного диаметра отражателя, определяются измерением. Из их числа выделим расстояния r , H и скорости c , c_1 . В современных дефектоскопах они могут быть измерены с весьма малой относительной погрешностью и поэтому не являются определяющими при формировании погрешности измерения эквивалентного диаметра. В дальнейшем в интересах краткости изложения будем предполагать эти величины точно известными. Значительно более существенными и трудно устранимыми являются ошибки при измерении амплитуд эхосигналов A_1 и A_{b1} , вызванные разбросом условий контакта (неодинаковость степени прижима, свойств контактной жидкости, шероховатости поверхностей контрольного образца и детали), а также конструктивным несовершенством ПЭП. Существенную роль играет неточность определения коэффициентов поглощения. Она приводит к тем большим ошибкам, чем больше расстояние до дефекта. Наконец, неточность определения рабочей частоты приводит к неверному вычислению нормированного расстояния и, вследствие этого, к ошибке в определении эквивалентного диаметра. Ошибки при вычислениях (например, ошибки интерполяции) здесь не рассматриваются, так как они могут быть низведены до приемлемо малых значений.

Переходя к количественным соотношениям, будем предполагать, что ошибки не слишком велики, так что в приводимых ниже выражениях дифференциалы можно заменить конечными приращениями. Учитывая приведенные выше формулы для обобщенных переменных x и u , нетрудно установить, что относительная погрешность вычисления эквивалентного диаметра отражателя: $\delta d/d = 0,025\delta u$.

Определяя δu через дифференциал функции $u(A, x)$, находим

$$\frac{\delta d}{d} = 0,025 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \delta x + \frac{\partial u}{\partial A} \delta A \right). \quad (5)$$

Учитывая формулу для обобщенного расстояния, получаем: $\delta x = -\delta f/f$. Из формулы (1) для приведенной амплитуды следует:

$$\delta A = \delta A_1 - \delta A_{b1} + \frac{\partial A_b}{\partial x} \frac{\delta f}{f} + (r\delta\alpha - H\delta\alpha_1) 40\lg(e). \quad (6)$$

После подстановки в (5), получаем:

$$\frac{\delta d}{d} = 0,025 \left(- \left(\frac{\partial u}{\partial A} \frac{\partial A_b}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \frac{\delta f}{f} + \frac{\partial u}{\partial A} \delta A' \right). \quad (7)$$

Здесь величина

$$\delta A' = \delta A_1 - \delta A_{b1} + (r\delta\alpha - H\delta\alpha_1) 40 \lg(e). \quad (8)$$

определяет погрешность измерения приведенной амплитуды, вызванную ошибками при непосредственном измерении амплитуд эхосигналов и при измерении поглощения звука в материалах детали и контрольного образца. В состав $\delta A'$ можно ввести также погрешность, возникающую вследствие того, что в ближней зоне кривые АРД проходят по-разному в зависимости от формы и длительности импульсного сигнала [1].

Формула (7) определяет относительную погрешность как случайную величину, линейно зависящую от других случайных величин, являющихся результатами непосредственных измерений. Среднеквадратичное значение случайной относительной погрешности вычисляется по обычным правилам математической статистики с учетом средних значений (смещений) и дисперсий результатов непосредственных измерений, которые в данном случае можно считать статистически независимыми. Если предположить, что оценка значения рабочей частоты является несмещенной, то эффективную относительную погрешность измерения эквивалентного диаметра следует определять по формуле:

$$\frac{\delta d}{d} = 0,025 \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial A} \frac{\partial A_b}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \frac{\delta f^2}{f^2} + \left(\frac{\partial u}{\partial A} \right)^2 \delta A'^2}. \quad (9)$$

Треугольные скобки означают статистическое усреднение. Величина среднеквадратичной погрешности измерения приведенной амплитуды $\langle \delta A'^2 \rangle$ зависит от методики проведения измерений и в общем случае, когда для калибровки используется специальный образец, материал которого не совпадает с материалом детали, будет

$$\begin{aligned} \langle \delta A'^2 \rangle = & \langle \delta A_1^2 \rangle - \langle \delta A_{b1}^2 \rangle + (r \langle \delta\alpha \rangle - \\ & - H \langle \delta\alpha_1 \rangle) (40 \lg(e))^2 + \\ & + \sigma_{A1}^2 + \sigma_{Ab1}^2 + (r^2 \sigma_\alpha^2 + Y \sigma_{\alpha1}^2) (40 \lg(e))^2. \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь через σ^2 обозначена дисперсия соответствующей величины. Смещения оценок амплитуд эхосигналов при измерении и при калибровке $\langle \delta A_1 \rangle$, $\langle \delta A_{b1} \rangle$ обусловлены, в частности, состоянием поверхностей контакта. Если возможно провести калибровку по донному сигналу на самой детали, то погрешность может быть снижена, так как на одной и той же поверхности контакта разность $\langle \delta A_1 \rangle - \langle \delta A_{b1} \rangle$ может быть значительно

снижена. Влияние погрешности измерения коэффициента поглощения также уменьшается:

$$\begin{aligned} \langle \delta A'^2 \rangle &= (\langle \delta A_1 \rangle - \langle \delta A_{b1} \rangle)^2 + \sigma_{A1}^2 + \sigma_{Ab1}^2 + \\ &+ \langle \delta \alpha^2 \rangle (r - H)^2 (40 \lg(e))^2. \end{aligned} \quad (11)$$

Таким образом, методику калибровки по донному сигналу на самой детали (если она возможна) следует признать предпочтительной.

Более детальный анализ погрешности определения приведенной амплитуды требует конкретизации методики измерения коэффициентов поглощения, условий проведения измерения амплитуд и конструктивных особенностей ПЭП. Ниже, для получения численных оценок относительной погрешности измерения эквивалентного диаметра мы давали среднеквадратичную погрешность измерения приведенной амплитуды в целом.

Результаты численных расчетов. Формула (9) позволяет оценить относительную среднеквадратическую погрешность измерения эквивалентного диаметра отражателя. Если расстояния при калибровке и при измерении относятся к дальней зоне, то $\frac{du}{dA} = 1$, $\frac{du}{dx} = 40$, $\frac{dA_b}{dx} = -20$. Тогда

$$\frac{\delta d}{d} = 0,025 \sqrt{400 \frac{\langle \delta f^2 \rangle}{f^2} + \langle \delta A'^2 \rangle}. \quad (12)$$

Эта простая формула позволяет получить следующие оценки. При допуске на отклонение рабочей частоты от номинального значения $\pm 10\%$ замена действительного значения частоты номинальным значением может привести к погрешности порядка $\pm 5\%$. Если при этом условии принять, что суммарная погрешность определения приведенной амплитуды $\delta A'$ изменяется от 1 до 6 дБ, то среднеквадратическая погрешность измерения эквивалентного диаметра будет пробегать значения от 5,6 до 16 %. Значению результирующей погрешности 10 % соответствует $\delta A' = 3,5$ дБ.

Если расстояние при калибровке соответствует ближней зоне ($x < 0$, $r < R$), то можно приближенно принять $\frac{dA_b}{dx} = 0$. В этом случае:

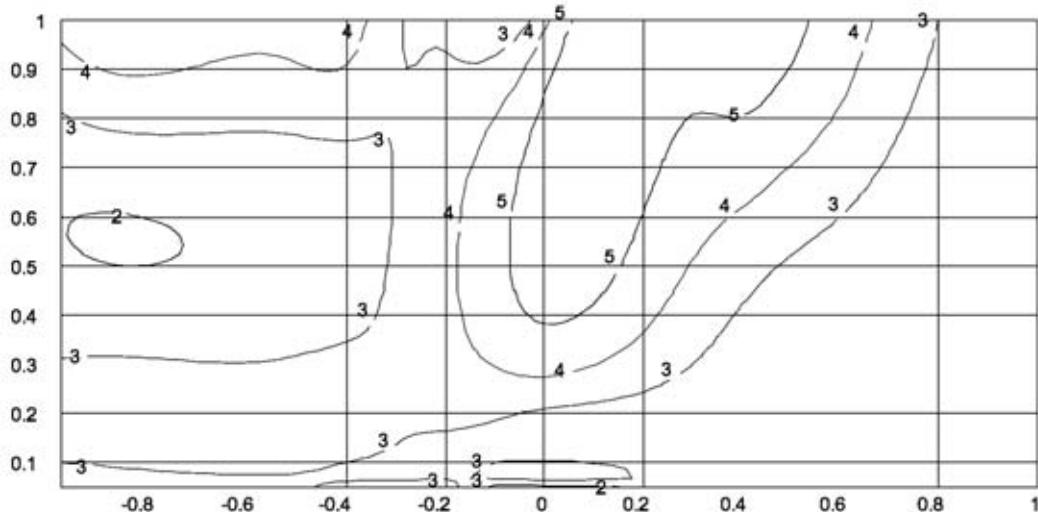


Рис. 1. Распределение относительной погрешности при неточном определении только приведенной амплитуды в процентах

$$\frac{\delta d}{d} \approx 0,025 \sqrt{1600 \frac{\langle \delta f^2 \rangle}{f^2} + \langle \delta A'^2 \rangle}. \quad (13)$$

Погрешность за счет неточного определения частоты увеличивается и приводит при сформулированном выше условии к значению $\pm 10\%$. При изменении $\delta A'$ от 1 до 6 дБ результирующая ошибка принимает значения от 10,3 до 18 %.

В случае, когда дефект находится в ближней или промежуточной зоне, значения производных, входящих в формулу (9) и характеризующих дифференциальные свойства АРД-поверхности, должны быть определены численно. В соответствии со способом задания функции $u(A, x)$, который описан выше, частная производная $\frac{du}{dA}$ вычислялась как производная от полинома, а частные производные $\frac{du}{dx}$ и $\frac{dA_b}{dx}$ находились как конечно-разностные производные.

Рассмотрим несколько характерных вариантов расчета, позволяющих оценить влияние различных факторов. Предположим, что рабочая частота определена точно. Тогда, как следует из формулы (9), относительная погрешность пропорциональна производной $\frac{du}{dA}$, среднеквадратичной погрешности измерения приведенной амплитуды и не зависит от расстояния до дна при калибровке:

$$\frac{\delta d}{d} = 0,025 \left(\frac{du}{dA} \right) \sqrt{\langle \delta A'^2 \rangle}. \quad (14)$$

Распределение погрешности на плоскости аргументов $g = d/D$ и $x = \lg(r/R)$, которые соответствуют общепринятым масштабам при изображении АРД-диаграмм, показано линиями уровня на рис. 1 для $\langle \delta A'^2 \rangle = 1$ дБ.

Как видно из рис. 1, наибольшая погрешность возникает при измерении относительно больших диаметров ($d/D > 0,3$), если дефект находится в промежуточной зоне.

Рассмотрим гипотетический альтернативный случай, когда $\langle \delta A'^2 \rangle = 0$ и погрешность обусловлена лишь неточностью задания рабочей частоты. В этом случае относительная погрешность измере-

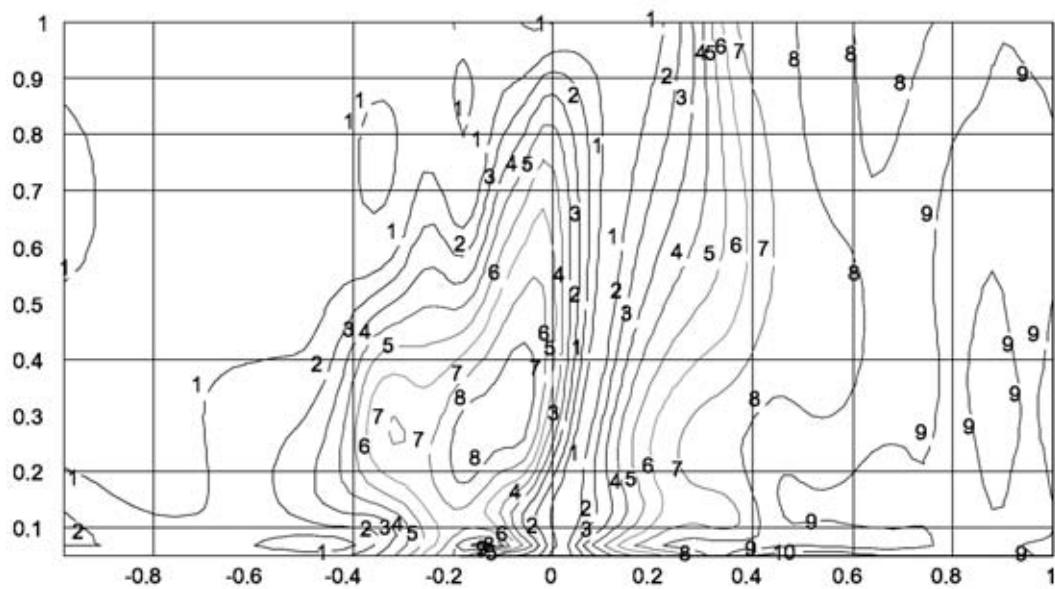


Рис. 2. Распределение относительной погрешности при $x_H = -0.5$ при неточном определении частоты

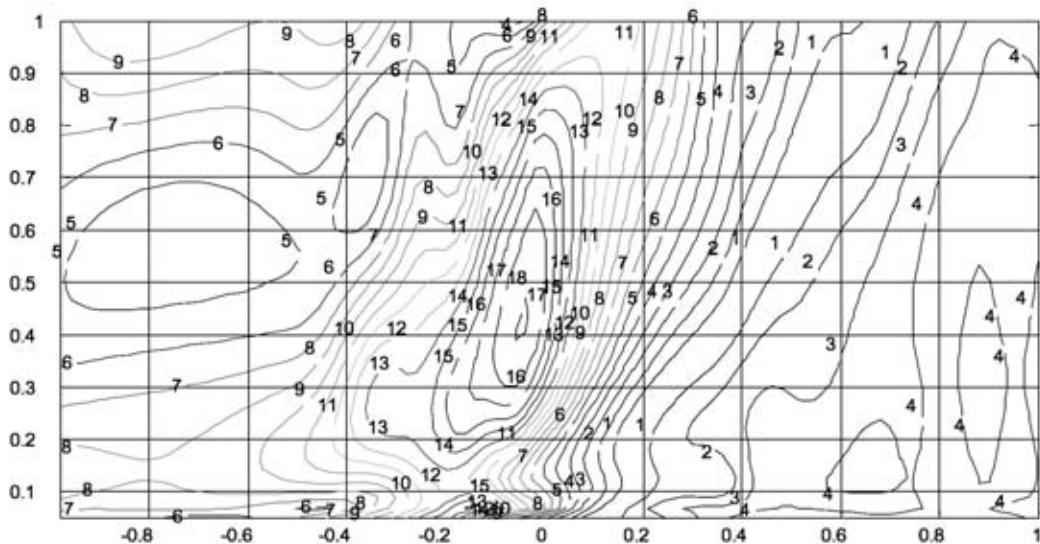


Рис. 3. Распределение относительной погрешности при $x_H = -1$ при неточном определении только частоты

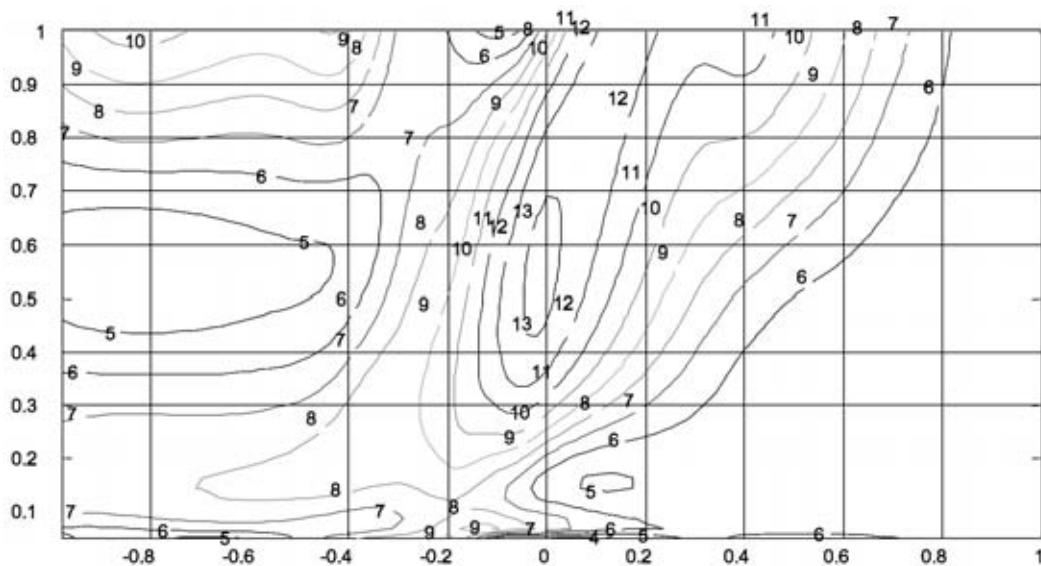


Рис. 4. Распределение относительной погрешности при $x_H = -0.5$ при неточном определении частоты и приведенной амплитуды

ния эквивалентного диаметра пропорциональна относительной погрешности измерения частоты:

$$\frac{\delta d}{d} = 0,025 \left| \frac{\partial u}{\partial A} \frac{\partial A_b}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \right| \frac{\sqrt{\langle \delta f^2 \rangle}}{f}. \quad (15)$$

Как видно из формулы (15), она зависит через $\partial A_b / \partial x |_{x=x_H}$ от расстояния до дна при калибровке. Распределения относительной погрешности при $x_H = -0,5$ (ближняя зона) и при $x_H = 1$ (граница дальней зоны) приведены на рис. 2 и 3 для относительной погрешности задания рабочей частоты, равной 10 %.

Наибольшие значения относительной погрешности наблюдаются при измерении средних и малых относительных диаметров в промежуточной зоне. Наблюдается также увеличение погрешности при смещении дефекта в сторону дальней зоны. Сходная картина наблюдается и на рис. 3. Однако в этом случае погрешность измерения эквивалентных диаметров дефектов, лежащих в промежуточной зоне, значительно больше по сравнению с предыдущим случаем. Напротив, погрешность измерения для дефектов, лежащих в дальней зоне, меньше. Приведенные результаты расчетов указывают на важность уточнения рабочей частоты при измерении эквивалентного диаметра дефекта.

На практике мы наблюдаем совместное влияние всех факторов на точность измерения. Ниже приведен пример распределения относительной погрешности для случая, когда $\langle \Delta A^2 \rangle = 2 \text{ дБ}$ и неточность определения рабочей частоты составляет 5 %.

НПФ «Промпрылад»,
Киев

Поступила в редакцию
05.03.2003

Выводы

Представленный выше анализ погрешностей измерения эквивалентного диаметра дефекта на основе АРД-диаграмм прямыми пьезопреобразователями позволяет сделать следующие заключения.

1. Величина относительной погрешности определяется не только ошибками при непосредственном измерении величин, входящих в расчет, но и точкой на АРД-поверхности, к которой относятся измерения, т. е. значением обобщенного расстояния и относительного диаметра, а также значением обобщенного расстояния при калибровке. Оценки погрешностей, полученные для дальней зоны, могут заметно отличаться от погрешностей в ближней и промежуточной зонах.

2. Предпочтительным является вариант калибровки с использованием донного сигнала на самой контролируемой детали (при наличии такой возможности).

3. При проведении измерений целесообразно уточнить рабочую частоту ПЭП по сравнению со значением из ряда номинальных частот.

1. *Неразрушающий контроль и диагностика*. Справочник / Под ред. В. В. Клюева. — М.: Машиностроение, 1995. — 480 с.
2. Ермолов И. Н. Теория и практика ультразвукового контроля. — М.: Машиностроение, 1981. — 240 с.
3. Алешин Н. П., Белый В. Е., Вопилкин А. Х., Вошанов А. К., Ермолов И. Н., Гурвич А. К. Методы акустического контроля металлов. — М.: Машиностроение, 1989. — 456 с.

Украинский информационный Центр «НАУКА. ТЕХНИКА. ТЕХНОЛОГИЯ»

сообщает о **перенесении сроков проведения**

Однадцатой международной конференции и выставки

«Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики»
в г. Ялта с 29 сентября–3 октября 2003 г. на **6–10 октября 2003 г.**



КОМПЬЮТЕРИЗИРОВАННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ НК ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗМЕРОВ НЕСПЛОШНОСТЕЙ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ОТВЕТСТВЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДАМИ СИНТЕЗИРОВАННОЙ ФОКУСИРУЮЩЕЙ АПЕРТУРЫ

Е. А. ДАВЫДОВ, В. П. РАДЬКО

Рассмотрена одна из реализаций метода синтезированной фокусирующей апертуры. Приведены примеры визуализации несплошностей, обнаруженных в сварных соединениях действующих промышленных объектов.

One of the embodiments of the method for synthesized focusing aperture is considered. Examples of displaying of discontinuities detected in welded joints in active commercial objects are given.

Метод синтезированной фокусирующей апертуры (SAFT) — это метод моделирования широкодиапазонного фокусирующего луча ультразвукового (УЗ) преобразователя посредством цифровой обработки амплитуд сигналов во всем диапазоне контроля и информации, получаемой посредством сканирования несплошностей обычным нефокусированным лучом. Использование SAFT является технологическим преимуществом по сравнению с обычными фокусирующими преобразователями, имеющими различные фокусные расстояния.

Рассмотрим принцип восстановления изображений методом синтезированной апертуры. Изображение $I(r)$ по методу SAFT вычисляется в соответствии с формулой:

$$I(r) = \frac{1}{n(r)} \sum_{i=1}^{n(r)} |\mathbf{r} - \mathbf{r}_{si}|^2 s(2|\mathbf{r} - \mathbf{r}_{si}| / C_0, \mathbf{r}_{si}), \quad (1)$$

где $s(t, \mathbf{r}_{si})$ — УЗ сигнал, отраженный от неоднородностей и принимаемый преобразователем, расположенным в точке с радиус-вектором \mathbf{r}_{si} ; $n(r)$ — число отсчетов или положений преобразователя, принимающих сигнал из точки r ; C_0 — скорость распространения ультразвуковых волн в объекте.

Основная идея метода проиллюстрирована на рис. 1.

Если преобразователь излучает δ -импульс в угловой области α , то прием отраженного сигнала в момент времени t_0 означает, что неоднородность может находиться в любом месте на дуге радиусом $r_0 = 2t_0C_0$ с центром в точке отсчета преобразователя. Дуги, построенные при разных положениях преобразователя, пересекаются в месте расположения отражателя. Таким образом, суперпозиция сигналов $s(t, \mathbf{r}_{si})$, $i = 1, 2, \dots, n$, приведет к увеличению уровня изображения в месте расположения отражателя. Применяя подобную процедуру ко всем точкам пространства, получают в данном случае изображение сечения объекта контроля по линии перемещения преобразователя (В-скан).

Качество изображения ухудшается как при увеличении длительности импульса, так и при уменьшении угла α и точек отсчета.

Е. А. Давыдов, В. П. Радько, 2003

Для анализа метода перечислим допущения, заложенные в алгоритм восстановления изображения.

1. Волновое поле считается скалярным, т. е. не учитываются различные виды распространяющихся волн и их трансформации.

2. Дефект или неоднородность представляется в виде совокупности одиночных не взаимодействующих скалярных точечных рассеивателей, которые функционируют как вторичные точечные источники.

3. Поле считается излученным от скалярного точечного источника, и отраженное поле принимается также точечным источником.

4. Излучаемый импульс считается приближающимся к широкополосному, т. е. во временной области импульс близок к δ -импульсу.

Строго говоря, только при выполнении этих условий можно получить адекватное представление о формах и размерах неоднородностей объекта контроля. Проанализируем кратко перечисленные приближения. Ограниченностимпульса и конечные размеры преобразователя приводят к ухудшению изображения: увеличивается продольное и поперечное разрешение. Первое допущение всегда выполняется и следует предпринимать определенные усилия, чтобы, по возможности, не возбуждать и не принимать одновременно и продольные, и поперечные волны.

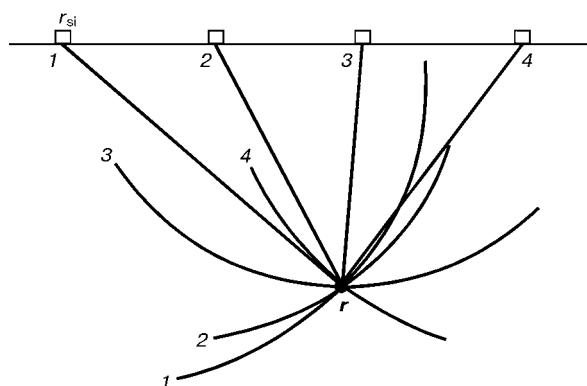


Рис. 1. Иллюстрация принципа SAFT: дуги окружностей — это возможное положение отражателя при данном положении приемника



Построение изображения с учетом трансформированных волн, в принципе, возможно, но при этом существенно увеличивается массив обрабатываемых данных и соответственно время обработки. Для реализации этого необходимо учесть три пути приема отраженного от дефекта сигнала: 1) излучатель–дефект–приемник; 2) излучатель–граница объекта–дефект–приемник; 3) излучатель–граница объекта–дефект–граница объекта–приемник. Учет всех траекторий лучей не вносит принципиальных отличий в алгоритм вычислений, лишь увеличивает затраты времени на получение изображения. Наиболее уязвимым является второе предположение, так как оно приводит к ряду особенностей при восстановлении протяженных неоднородностей.

Для реализации метода была адаптирована автоматизированная УЗ система, блок-схема которой представлена на рис. 2.

Полученные данные обрабатывались на компьютере в соответствии с выражением (1) и учетом геометрических характеристик объекта контроля. Как следует из рис. 2, реализация изображения осуществляется в два этапа сбора и обработки информации. В практике УЗ неразрушающего контроля обычно не требуется построения изображения

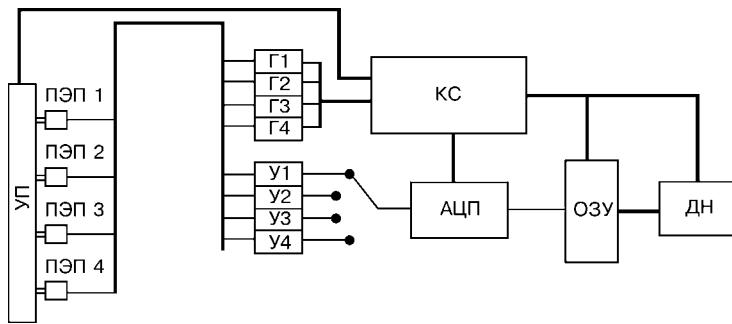


Рис. 2. Блок-схема системы для реализации метода синтезированной апертуры: ПЭП – пьезоэлектрический преобразователь; УП – устройство перемещения и позиционирования ПЭП (сканер); Г1-Г4 – генераторы УЗ импульсов; У1-У4 – усилители электрических сигналов; КС – контроллер системы; АЦП – аналогово-цифровой преобразователь (10 разрядов, 8...30 МГц); ОЗУ – оперативное запоминающее устройство (буфер); ДН – дисковый накопитель

в реальном масштабе времени. Поэтому сбор информации может осуществляться в несколько этапов, а обработка будет основываться на всем массиве собранной информации.

Для увеличения достоверности и большей адекватности реконструируемой неоднородности сканирование следует проводить ПЭП с различными углами ввода (фактически это увеличивает диапазон угла α). При этом изображение $I(\mathbf{r})$ вычисляется по формуле: $I(\mathbf{r}) = I(\mathbf{r})_1 + I(\mathbf{r})_2 + \dots + I(\mathbf{r})_m$, где

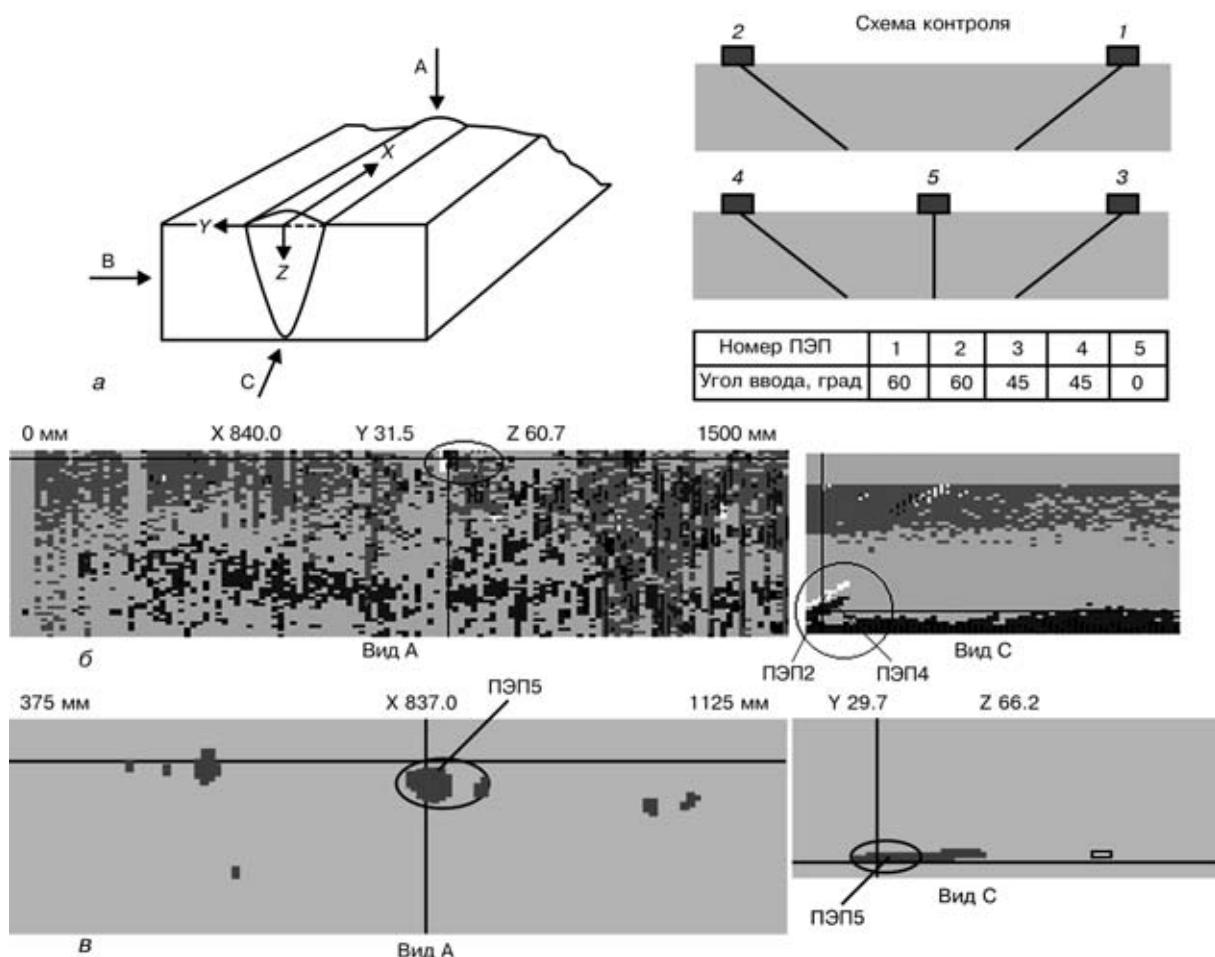


Рис. 3. Схема контроля сварного соединения (а) и визуализация результатов сканирования для ПЭП1-4 (б) и ПЭП 5 (в), полученная традиционным УЗ методом

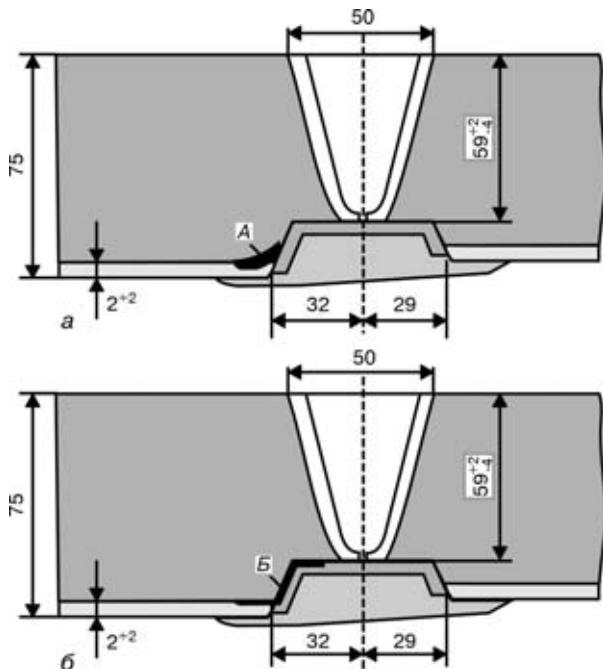


Рис. 4. Результат расчета местоположения источника отражения А по методу SAFT (а) и действительный вид несплошности Б в сварном соединении (б)

$I(\mathbf{r})_k$ — изображение, вычисленное по формуле (1) для соответствующего преобразователя k , $k = 1, 2, \dots, m$.

Эффективность предложенного алгоритма проиллюстрируем двумя примерами изображений, построенными традиционно и методом синтезированной апертуры.

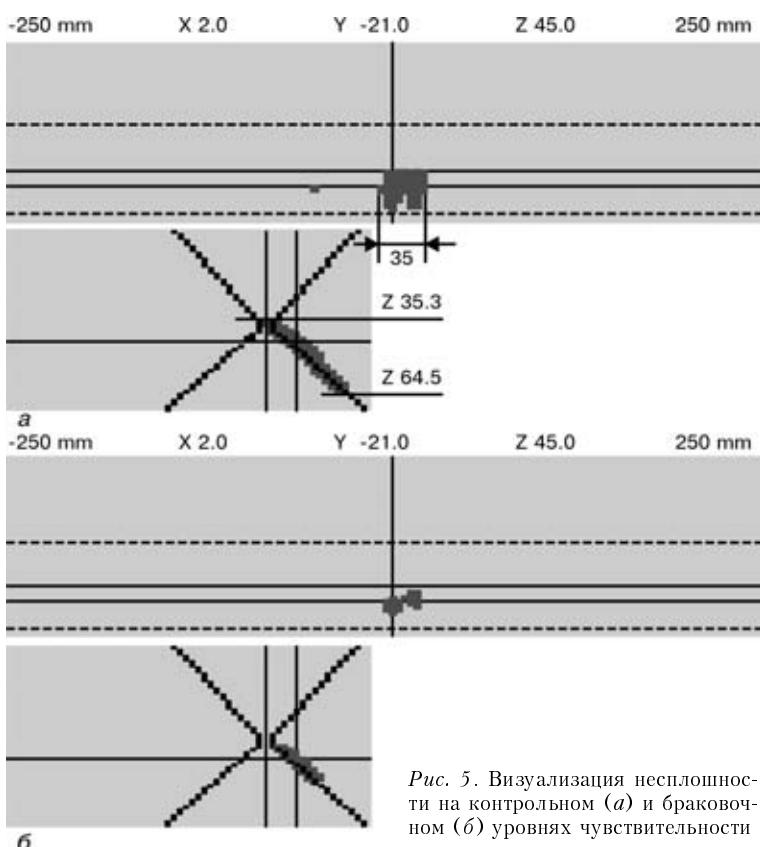


Рис. 5. Визуализация несплошности на контролльном (а) и браковочном (б) уровнях чувствительности

Пример 1. УЗК сварного соединения главного центрального трубопровода АЭС. Во время проведения штатного УЗК была обнаружена несплошность с эквивалентной площадью отражения в несколько раз большей, чем предельно допустимое значение. Условные размеры по высоте также превышали нормативные значения. Попытки определить дополнительные характеристики несплошности оказались неудачными. В частности, не удалось исключить главный и наиболее опасный вариант — предположение, что несплошность является трещиноподобной (впрочем, подтвердить это также не удалось).

Задачей экспериментального контроля являлось определение характера и степени опасности несплошности для эксплуатации трубопровода. УЗК был выполнен с помощью компьютеризированной системы, которая обеспечивала механическое сканирование, позиционирование преобразователей и сохранение данных контроля на электронных носителях. Это позволило связать и проанализировать результаты контроля для различных типов преобразователей, а также выполнить совместную математическую обработку данных по методу SAFT.

УЗ контроль всего сварного соединения был выполнен ПЭП с углами ввода в металл 0, 45 и 60° (4 МГц). На рис. 3 представлена визуализация результатов УЗ сканирования участка сварного соединения, построенная традиционно, без математической обработки данных, а на рис. 4, а — математическая реконструкция местоположения неоднородности по методу SAFT, совмещенная со схемой сварного соединения.

На основе построенного изображения предположена модель несплошности — уголковый отражатель, образованный отслоением наплавки от основного металла. Для подтверждения этого предположения проанализирована зависимость амплитуды отраженного сигнала от положения ПЭП, в которой были учтены диаграмма направленности и известная зависимость коэффициента отражения от угла падения для углового зеркала. В результате удалось установить, что реальная зависимость амплитуды отраженного сигнала от положения ПЭП совпадает с расчетной моделью (угловым зеркалом) с точностью в 3 дБ.

Таким образом, реконструкция по методу SAFT позволила локализовать область отражения и определить характер и точное местоположение несплошности в сварном соединении. Действительное местоположение и вид несплошности представлены на рис. 4, б.

Пример 2. УЗК сварного соединения сепаратора нефтеперерабатывающего производства. Несплошность обнаружена при проведении штатного контроля. Эквивалентная площадь отражения несплошности составляет 19,6 мм^2 , что существенно превышает допустимый уро-

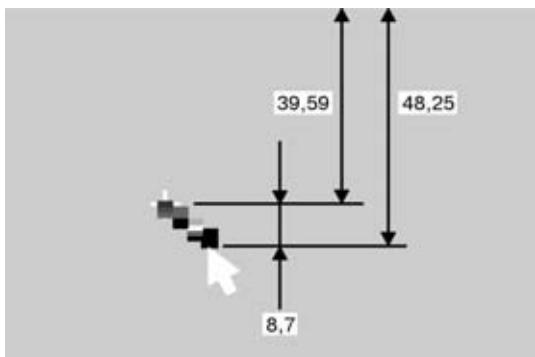


Рис. 6. Результат обработки УЗ данных по алгоритму SAFT

вень для сварных соединений толщиной 70 мм (формально: согласно «Инструкции по ультразвуковому контролю сварных соединений технологического оборудования /РДИ 38.18.002-83/» не более 7 мм^2). Условная высота несплошности — 29,2 мм.

Поскольку неоднородность оценена как недопустимая, а качественный ремонт сварного соединения такой большой толщины технологически осуществить очень сложно, то встал вопрос о реальных размерах этой несплошности. Ситуация существенно усугублялась тем, что несплошность имела явно выраженный плоскостной характер.

На рис. 5 представлены результаты визуализации несплошности для разных уровней отобра-

жения (чувствительности). Совершенно очевидно, что различия в оценках высоты несплошности более 200 %. Поэтому, основываясь на традиционных методах визуализации, не представляется возможным определить высоту несплошности с приемлемой точностью, пригодной для прочностных аналитических расчетов.

Для уточнения размеров несплошности по высоте был использован метод SAFT. Результаты обработки показаны на рис. 6. Как следует из данных обработки, уточненные размеры несплошности (по высоте) составляют ≈ 9 мм.

Выводы

Применение описанной системы визуализации и обработки результатов УЗ-данных позволяет получить более достоверную информацию о локализации и размерах несплошности. Отметим, что особенно эффективна обработка данных, полученных несколькими ПЭП с различными параметрами: углом ввода, частотой, азимутальной ориентацией и др. УЗ системы, позволяющие использовать современные способы обработки данных, целесообразно применять при инспекции оборудования АЭС, ТЭС, нефтеперерабатывающих и химических заводов. Следует отметить, что повышение безопасной эксплуатации оборудования невозможно без использования подобных систем НК.

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

Поступила в редакцию
20.01.2003

«Сварочные чтения. Теория и практика.»

17–19 июня 2003 г.

Конференция посвящена 300-летию Санкт-Петербурга
и 50-летию Института сварки России (ВНИИЭСО)

На конференции будут представлены доклады, посвященные юбилейным датам, а также отражающие современное состояние и перспективы развития сварочного производства по следующим основным темам:

- традиционные и новые технологические процессы сварки
- сварочное оборудование
- сварочные материалы
- сертификация и стандартизация в области сварки
- контроль качества сварных конструкций. Диагностика ресурса
- экология сварочного производства
- аттестация сварщиков
- информационное обеспечение потребителей

Материалы конференции будут изданы в виде юбилейного сборника. Пригласительный билет на конференцию будет выслан на основании заявки или предоставленных материалов для доклада или публикации.

Материалы следует направлять по адресу:

194100, Санкт-Петербург, ул. Литовская, д. 10

Институт сварки России, ученому секретарю — Тихоновой Ларисе Борисовне.

Факс/тел.: (812) 394-14-61, 245-40-95, тел.: (812) 245-03-08.

E-mail: science@rusweld.spb.ru



ВЛИЯНИЕ СОСТОЯНИЯ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ИЗДЕЛИЙ НА ВОЗМОЖНОСТЬ ПРОВЕДЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ, ИМЕЮЩИМИ ВЫСОКУЮ ЧАСТОТУ ИЗЛУЧЕНИЯ

С. А. САПРЫКИН, И. Б. КОЛБИН, Ю. А. ВОЛКОВ, М. М. ТОПЧИЙ, В. Н. ГОРБЕНКО

В последние годы наблюдается тенденция расширения сферы применения современных ультразвуковых преобразователей, имеющих высокую частоту излучения. Но, несмотря на то, что они имеют очевидные преимущества: узкую направленность, малое значение мертвых зон и высокую разрешающую способность в некоторых случаях это не может компенсировать всех сложностей, возникающих во время проведения контроля. Показано, что состояние внутренней поверхности контролируемых изделий может вносить существенные ограничения на применение преобразователей с высокой частотой излучения.

The recent trend is to extension of the field of application of modern ultrasonic transducers characterized by a high emission frequency. Despite the fact that they have apparent advantages, such as a narrow directivity range, small size of the silent zone and high resolution, there are cases where this cannot compensate for all the difficulties arising during monitoring. It is shown that the state of an internal surface of parts monitored may impose substantial limitations on the use of the transducers with a high emission frequency.

Улучшение технических средств для проведения ультразвукового контроля (УЗК) привели к масштабному использованию приборов и преобразователей (прямых, наклонных совмещенных и раздельно-совмещенных), которые рассчитаны на частоты выше 5 МГц. Это в первую очередь связано с желанием обеспечить наиболее оптимальные условия проведения контроля изделий, имеющих небольшую толщину стенок. К таким условиям следует отнести: уменьшение габаритов преобразователей, размера их стрелы и «мертвой» зоны, обеспечение ввода в изделие более узкого пучка УЗ колебаний, а также увеличение разрешающей способности. Но в то же время в существующих методиках проведения УЗК сварных соединений и основного металла не приведены те условия, при которых применение преобразователей с высокой частотой излучения (5 МГц и выше) является корректным и оправданным. Следует отметить, что в большинстве отраслей промышленности до сих пор действуют документы, регламентирующие порядок проведения контроля, которым уже больше 20–30 лет. Естественно, что в них не отражены технические новшества последних десятилетий, которые привели к значительным изменениям аппаратуры для проведения контроля.

Не всегда использование высоких частот излучения УЗ сигналов дает положительный эффект, о котором сказано выше. Примером, который это подтверждает, может стать явление, замеченное при проведении выходного контроля таврового сварного соединения стерилизатора-автоклава водяного технологического (рис. 1). Оно связано с влиянием качества донной поверхности проверяемого изделия на амплитуду отраженного сигнала. Следует отметить, что такие изделия в последнее время находят широкое применение в пищевой промышленности. Они рассчитаны на низкое давление (до 0,25 МПа), имеют сравнительно небольшую толщину стенки (7...10 мм) и, следовательно, к ним применимы изложенные выше соображения,

относящиеся к использованию для проведения контроля высоких частот излучения сигналов. В соответствии с этим контроль слоя наплавленного металла, прилегающего к катету шва, параллельному обечайке (см. рис. 1 и 2), проводят прямыми преобразователями с использованием частоты излучения 5 или 10 МГц. В процессе контроля оператор перемещает преобразователь 8 по траектории 10 (см. рис. 2). В его крайних положениях — **а** и **в**, на экране дефектоскопа появляются импульсы, которые соответствуют сигналам, отраженным от участков поверхности обечайки 1, расположенных в непосредственной близости от границ усиления шва на расстоянии S_1 от поверхности ввода (соответствующая осциллограмма приведена на рис. 3, *a*). Именно момент появления таких импульсов (при движении преобразователя слева направо или справа налево) служит для опытного специалиста сигналом о необходимости смены направления движения на обратное. В промежуточных положениях преобразователя (между **а** и **в**), например, в положе-

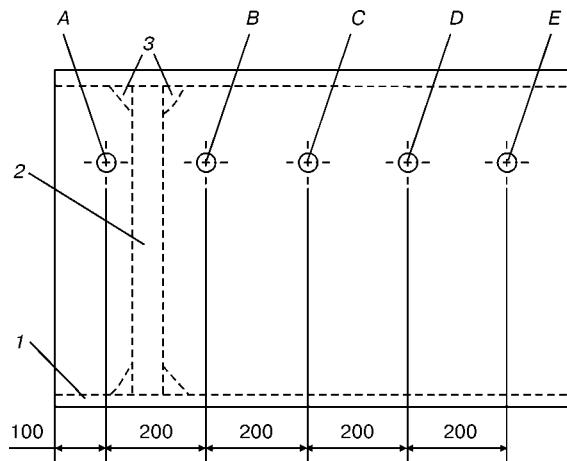


Рис. 1. Схема расположения участков *A–E*, использованных для измерения амплитуд эхо-сигналов, отраженных от внутренней поверхности стерилизатора-автоклава: 1 — обечайка; 2 — днище; 3 — усиления швов, соединяющих обечайку и днище



жении **б**, импульсы на экране не появляются (при условии, что на данном участке шва нет дефекта, а при его наличии в зоне между S_1 и K появляется импульс (рис. 3, б).

Описанные выше чередования осцилограмм при сканировании преобразователем по траектории 10 (см. рис. 2) характерны для случаев, когда внутренняя поверхность обечайки не имеет существенных отклонений от нормального состояния. Иная картина наблюдается при контроле изделий, внутренняя поверхность которых имеет значительные коррозионные повреждения либо другие отклонения ее рельефа от характерного для изделия. Наиболее типичные примеры таких отклонений: большая шероховатость, неровности после первичной обработки (литья, прокатки, формовки), наличие пятен окалины, а также риски, вмятины, забоины и т. п.

В процессе сканирования поверхности обечайки стерилизатора с толщиной стенки 7 мм (толщина днища — 14 мм) было замечено, что при достижении преобразователем положений **а** и **в** сигнал от внутренней поверхности сосуда не фиксировался. Для его фиксации приходилось увеличивать поисковый уровень чувствительности на 6 дБ и более. При помещении преобразователя на рабочий эталон (РЭ), который имел такую же толщину, как и контролируемое изделие, импульс на экране (на расстоянии S_1), соответствующий донному сигналу, можно было наблюдать на поисковом уровне чувствительности. При этом амплитуда сигнала превышала установленный для $S_{\text{пр}} = 5 \text{ mm}^2$ браковочный уровень на 10...12 дБ. Чтобы изучить это явление, внутреннюю поверхность обечайки исследовали с применением визуально-оптического метода контроля. Установлено, что обечайка сосуда, изготовленная из отрезка трубы диаметром 800 мм, была подвержена длительному атмосферному воздействию (очевидно, труба хранилась под открытым небом). Ее внутренняя поверхность покрыта сплошным слоем продуктов коррозии (на наружной поверхности продукты коррозии во время операций изготовления сосуда были удалены, а в зоне расположения таврового соединения поверхность обработана до класса чистоты не хуже Rz 20).

Для того чтобы установить зависимость между амплитудой отраженных от внутренней поверхности сосуда сигналов и степенью ее коррозионного поражения проведены эксперименты, описанные ниже. Вдоль линии, совпадающей с образующей сосуда, на его наружной поверхности было подготовлено пять участков. Диаметр каждого участка находился в пределах 25...30 мм, класс чистоты обработки — Rz 20. Для проведения измерений использованы прямые преобразователи трех типов: П111-10-К6-001, П111-5-К6-001 и П111-5-3х4-002. С помощью каждого из них на участках выполнено по пять измерений амплитуды эхо-сигналов от внутренней поверхности. Данные по каждому из участков были усреднены. Абсолютные значения отклонений результатов в каждой из

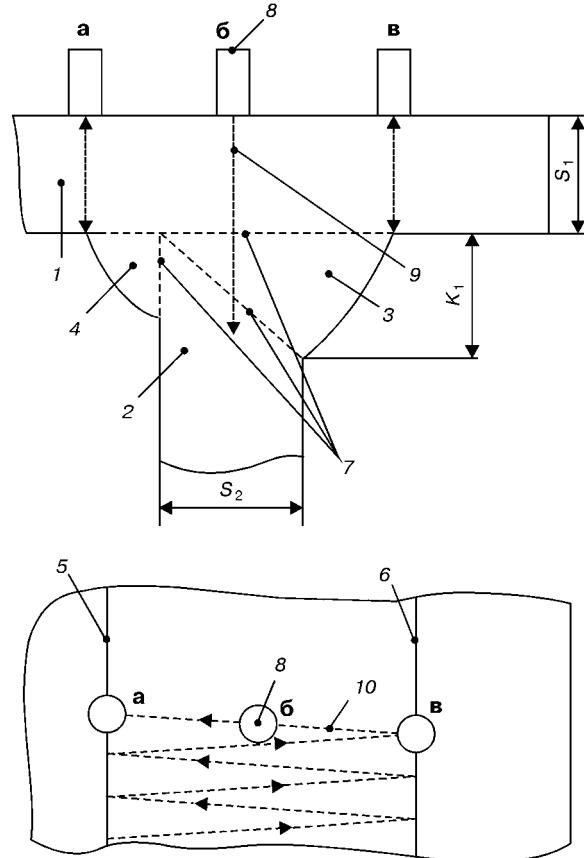


Рис. 2. Схема проведения контроля таврового сварного соединения с применением прямого преобразователя: 1 — обечайка; 2 — днище; 3, 4 — усиление наружного и внутреннего швов; 5, 6 — риски, обозначающие проекции границ усиления швов на поверхность обечайки; 7 — контуры деталей в зоне сплавления; 8 — прямой преобразователь; 9 — акустическая ось преобразователя; 10 — траектория перемещения преобразователя по поверхности обечайки

серий измерений не превышали 1...2 дБ. С использованием этих результатов построены графики зависимости амплитуды эхо-сигналов от координаты участка вдоль образующей (рис. 4).

Следует отметить, что благодаря применению регулировки амплитуды зондирующих импульсов

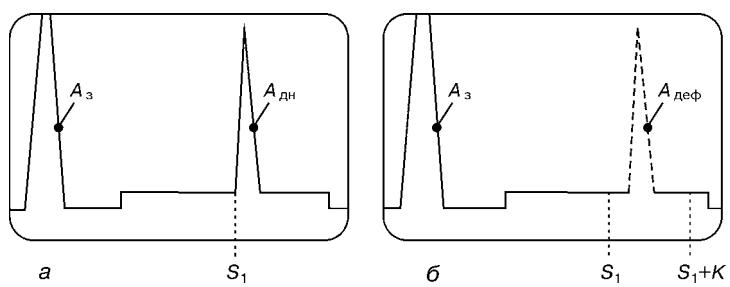


Рис. 3. Осциллограммы, наблюдаемые на экране дефектоскопа при проведении контроля тавровых сварных соединений прямым преобразователем: **а** — осциллограмма, получаемая в случае нахождения преобразователя в положении **а** и **в** (см. рис. 2); **б** — осциллограмма, получаемая в случае нахождения преобразователя в положении **б** (см. рис. 2); A_3 , $A_{\text{дн}}$ — зондирующий и донный импульсы; $A_{\text{деф}}$ — импульс, появляющийся при наличии сигнала от дефекта в зоне сварного соединения; S_1 — координата на горизонтальной оси развертки в месте появления импульса, соответствующего сигналу от внутренней поверхности изделия; S_1+K — координата на горизонтальной оси развертки, ограничивающая зону индикации сигналов от дефектов в сварном соединении, которые находятся на максимальной глубине от наружной поверхности изделия

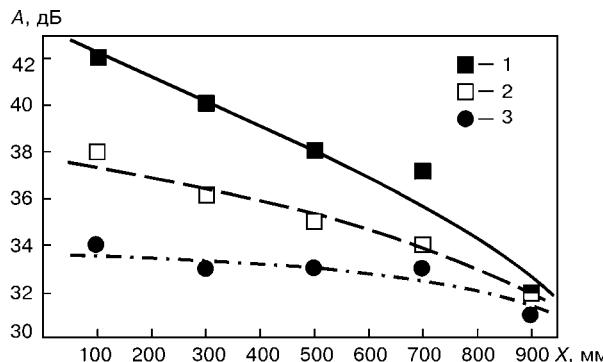


Рис. 4. Зависимости амплитуд эхо-сигналов, полученные с применением трех различных преобразователей, помещенных на участках поверхности обечайки вдоль образующей А-Е (см. рис. 1): П111-10-К6-001 (1), П111-5-К6-001 (2), П112-5-3х4-002 (3)

перед проведением измерений каждым из трех преобразователей, мы добились расположения всех полученных зависимостей в одной области значений амплитуд. Для изучения проблемы важны не абсолютные значения амплитуды сигналов, а их относительные изменения, зафиксированные с помощью каждого из преобразователей в пределах последовательности из пяти участков. Графики представляют собой монотонно убывающие кривые, отличающиеся только углом наклона к оси X . По оси X отложены расстояния вдоль образующей цилиндрической поверхности от того торца сосуда, вблизи которого расположено сварное соединение, до участка, на котором проводились измерения.

Значения амплитуд эхо-сигналов, принимаемые каждым из трех преобразователей, уменьшались по мере приближения к торцу обечайки сосуда, совпадающим с краем трубы, из которой сосуд был изготовлен. Изменение наклона кривых в точке, которая соответствует значению X , равному 900 мм (см. рис. 4), можно объяснить более интенсивным протеканием коррозии на внутренней поверхности E обечайки (участок находился в непосредственной близости от края сосуда). Так, по сравнению с внутренней поверхностью участков $A-D$ (см. рис. 1) внутренняя поверхность участка E была покрыта более толстым слоем продуктов коррозии. Под этим слоем зафиксированы коррозионные язвы большего диаметра и глубины, чем на поверхности напротив участков $A-D$. Визуально-оптический и измерительный контроль, проведенный с помощью микроскопа МПБ-2 и индикатора часового типа ИЧ-10, позволил установить, что размеры язв (высота, диаметр) на участке E находились в пределах 0,3...0,4 мм. На остальных участках их максимальные размеры не превышали значений 0,2 мм, причем в от точки D к точке A эти размеры уменьшались. Плотность расположения язв на участке E также была выше, чем на остальных (в направлении от A к E наблюдалась тенденция увеличения плотности язв). Именно значительным различием параметров коррозионных повреждений, которые зафиксированы во время проведения визуального осмотра внутренней поверхности E по сравнению с $A-D$, можно объяснить изменение наклона кривых в точке, соответствующей этому участку.

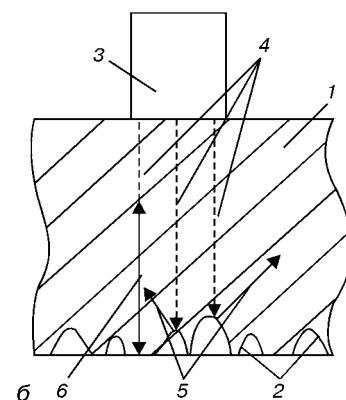
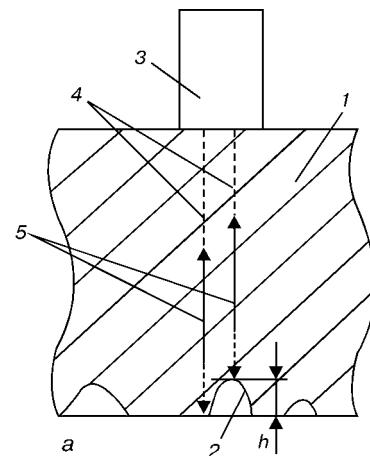


Рис. 5. Графическая интерпретация условий возникновения явлений интерференционных (а) и рассеяния (б) в изделии, имеющем язвенные коррозионные повреждения внутренней поверхности (h — высота коррозионной язвы)

Следовательно, интенсивность отраженного от донной поверхности УЗ сигнала в данном случае зависела не только от интенсивности излучаемых сигналов, диаграммы направленности, акустических свойств среды, но и от рельефа поверхности изделия, а также от длины волны УЗ колебаний. При значительных коррозионных повреждениях внутренней поверхности именно два последних фактора оказывают определяющее влияние.

На рис. 5 показана взаимосвязь между рельефом внутренней поверхности и акустическими волнами, распространяющимися в среде. Схематически изображены два механизма формирования отраженных от донной поверхности изделия сигналов при наличии коррозионных язв: интерференционный и рассеяния.

Интерференционные явления и их взаимосвязь со свойствами объекта, в котором распространяются УЗ волны, подробно рассмотрены в [1]. Выводы, сделанные там, мы попытались представить с помощью рис. 5, а. На нем схематически изображены две элементарные волны 4, излученные преобразователем 3. На границе раздела эти волны меняют направление распространения на обратное — 5. Допустим, одна из них отражается от донной поверхности изделия 1, а вторая от поверхности коррозионной язвы 2. Вполне очевидно, что полости определенной высоты h приведут к возникновению разности фаз этих двух элементарных волн — отраженной от полости и от ровного участка дна

изделия, расположенного возле полости. Причем в случае, если такая разность составляет половину длины волны или приближается к такому значению (т. е. $h \approx \lambda/2$), колебания частиц в волнах 4, 5 находятся в противофазе и гасятся. А следствием этого может стать изменение интенсивности сигнала, регистрируемого приемником. Естественно, что при увеличении плотности расположения полостей, высота h которых сравнима с $\lambda/2$, доля энергии, переносимая элементарными волнами в направлении приемника, будет уменьшаться.

Второй механизм, представленный на рисунке 5, 6, связан с рассеянием УЗ волн, отраженных от внутренней поверхности изделия 1. Округлые полости язв 2 являются ненаправленными отражателями, которые изменяют направление распространения падающих элементарных УЗ волн 4 на диаметрально противоположное только в случае, если это направление совпадает с проведенной в точке падения нормалью к касательной плоскости полости (рис. 5, а). В остальных случаях будет наблюдаться рассеяние падающих на поверхность язв элементарных волн 4, и направления распространения отраженных волн 5 не будут совпадать с направлением акустической оси преобразователя. Следовательно, принимаемый преобразователем полезный сигнал будет формироваться только за счет отражений от локальных участков поверхности язв, а также за счет тех участков донной поверхности, которые свободны от язв (на рисунке показана отраженная от плоской поверхности дна элементарная волна 6). Но и в этом случае, как было показано выше, возникающая интерференция приводит к ослаблению отраженного сигнала. Очевидно, что при наличии язвенной коррозии внутренней поверхности будут иметь место оба описанные выше механизмы ослабления донного сигнала, а доминирование одного из них будет зависеть от соотношения многих параметров: длины волны, размеров (высоты, диаметра) язв, их плотности расположения на поверхности изделия. Анализ влияния состояния внутренней поверхности изделия приведен в работах [2, 3] и он подтверждает сделанные нами выводы.

Анализируя полученные зависимости можно сделать вывод: наиболее восприимчивым к изменению качества внутренней поверхности обечайки оказался прямой совмещенный преобразователь с частотой излучения 10 МГц (на рис. 4 зависимость, полученная с применением такого преобразователя, изображена сплошной линией). Из графика видно, что по мере перемещения преобразователя от участка A к E амплитуда эхо-сигналов снижается на 9 дБ. Отдельно следует рассмотреть участок E , значительное уменьшение амплитуды эхо-сигнала на котором могло произойти вследствие интерференционного ослабления в результате совпадения половины длины волны (для частоты 10 МГц — 0,3 мм) со средним размером язв (0,3...0,4 мм) на его донной поверхности. Кроме того, более высокая по сравнению с остальными участками плотность язв вносила свой вклад как в интерференционное ослабление отраженного сигнала, так и в ослабле-

ние за счет повышенного рассеяния. При использовании раздельно-совмещенного преобразователя с частотой излучения 5 МГц, влияние качества поверхности на значение амплитуды эхо-сигнала оказывается в наименьшей степени (соответствующая кривая изображена на том же рисунке штрих-пунктирной линией). Это можно объяснить наличием фокусировки: обрабатываемый приемным устройством дефектоскопа сигнал формируется за счет отражения от участка поверхности, имеющего меньшую площадь, чем в случае применения совмещенных преобразователей. Вполне естественно, что попадание на шероховатую внутреннюю поверхность изделия сфокусированного пучка колебаний даст меньшую степень его рассеяния, чем степень рассеяния расходящегося пучка. Прямые преобразователи с частотой излучения 5 МГц по степени влияния на их показания неровностей внутренней поверхности изделия занимают промежуточное значение между двумя упомянутыми выше (зависимость изображена штриховой линией).

Следовательно, существенное влияние качества внутренней поверхности (при наличии на ней коррозионных язв, рыхлот) наблюдается при использовании преобразователей с высокой частотой излучения — в первую очередь 10 МГц. Это можно объяснить возникновением явлений, связанных с достижением наиболее неблагоприятного соотношения между длиной волны УЗ колебаний (при 10 МГц — 0,6 мм) и средними размерами коррозионных язв, рыхлот и т. п., образовавшихся на внутренней поверхности изделия при интенсивно протекающей коррозии.

Применение преобразователя той же конструкции, но с частотой излучения 5 МГц, что соответствует длине продольной волны 1,2 мм, позволило заметно снизить влияние состояния внутренней поверхности на амплитуду отраженного от нее сигнала. Наиболее благоприятные для проведения контроля результаты были получены при использовании раздельно-совмещенного преобразователя частотой 5 МГц. Он оказался наименее чувствительным к изменению состояния внутренней поверхности контролируемого изделия. Следовательно, при проведении контроля прямыми преобразователями тонкостенных изделий, имеющих значительные неровности внутренней поверхности, наиболее оптимальным вариантом будет использование раздельно-совмещенного преобразователя с частотой излучения 5 МГц или ниже (последнее будет зависеть от конкретных условий проведения контроля). Такой преобразователь по сравнению с остальными, упомянутыми выше в статье, не будет затруднять расшифровку принимаемых сигналов. Кроме того, за счет большей стабильности показаний он будет способствовать повышению достоверности проводимого контроля.

Точно такие же соображения можно распространить и на результаты измерения характеристик, обнаруженных в процессе контроля дефектов. Очевидно, что УЗ волны разной длины будут иметь разную интенсивность при отражении от тех дефектов, поверхность которых имеет существенные отклонения от геометрически «правильных» форм



(таких, как плоскость, овальная полость и т. п.). К таким дефектам можно отнести трещины; шлаковые включения; непровары, заполненные шлаком и т. п. Естественно, что при наличии в изделии этих дефектов, наибольшую достоверность проводимого контроля можно получить в том случае, если длина УЗ волн будет намного превышать средний размер неровностей поверхности (выступов или впадин). Если длину излучаемых волн по какой-то причине увеличивать не целесообразно, например, если при этом получают недопустимое увеличение мертвой зоны или поперечного сечения пучка УЗ колебаний, то достижение желаемого эффекта можно получить, используя фокусирующие преобразователи. В последнем случае следует иметь в виду, что положительный результат достигается лишь тогда, когда поперечное сечение пучка УЗ волн в месте расположения дефекта превышает поперечные размеры этого дефекта.

Соображения, приведенные выше, конечно же, относятся и к проведению контроля зеркально-теневым методом, где в качестве основного информативного параметра используют значение донного сигнала на дефектном и бездефектном участках. При наличии существенной разницы между донными сигналами на разных участках изделия (в которых нет дефектов) использование этого метода теряет смысл из-за сложности расшифровки принимаемых сигналов. В этом случае следует изучить возможность использования оптимальных параметров контроля (см. выше). В частности, снижение частоты может дать положительный эффект лишь тогда, когда вызванное этим увеличение мертвой зоны, лучевой и фронтальной разрешающей способности не будут играть определяющей роли для обнаружения наиболее часто встречающихся дефектов в данном изделии. То же самое можно сказать и о возможности перехода к проведению контроля фокусирующими ПЭП — по нашему мнению их можно применить только в том случае, если фокусное расстояние преобразователя находится в том же слое изделия, что и наиболее часто встречающиеся дефекты.

Выводы

1. При проведении УЗК изделий, имеющих значительную шероховатость внутренней поверхности (размеры неровностей сравнимы с половиной длины волны), особое внимание следует уделять определению возможности его осуществления без внесения существенной погрешности, связанной с различием амплитуд сигналов, отраженных от донных поверхностей рабочего эталона и изделия.

2. При наличии существенной разности (3 дБ) между амплитудами сигналов по п. 1 следует либо вводить поправку и добавлять ее к полученным результатам, либо использовать преобразователь с более низкой частотой излучения.

3. Неоднородности (дефекты) в контролируемом материале, имеющие извилистый характер или поверхностные неровности, так же, как и в описанном выше в п. 1 случае, могут приводить к значительному ослаблению эхо-сигнала. Поэтому во многих случаях после проведения УЗ контроля изделий следует проводить уточнение эквивалентной площади найденных дефектов, применяя преобразователи с более низкой частотой излучения.

4. Использование зеркально-теневого метода контроля требует еще более жестких ограничений к состоянию донной поверхности контролируемых изделий. Целесообразность его применения необходимо проверять путем сравнения сигналов, полученных на нескольких произвольно выбранных участках изделия (как между собой, так и с сигналом, получаемым при использовании рабочего эталона).

5. Во всех перечисленных случаях для уменьшения влияния упомянутых выше негативных факторов, связанных с состоянием поверхности изделий и дефектов, наиболее целесообразно не только снижать частоту излучаемых сигналов, но и применять для проведения контроля фокусирующие преобразователи (например, широко распространенные сейчас раздельно-совмещенные).

1. *Крауткремер Й., Крауткремер Г. Ультразвуковой контроль материалов.* Справ. — М.: Машиностроение, 1991. — 750 с.
2. *Ермолов И. Н. Теория и практика ультразвукового контроля.* — М.: Машиностроение, 1981. — 240 с.
3. *Гурвич А. К., Ермолов И. Н. Ультразвуковой контроль сварных швов.* — Киев: Техника, 1972. — 460 с.

УкрНИИГаз,
г. Харьков

Поступила в редакцию
05.03.2003

ИЗМЕРЕНИЕ ТОЛЩИНЫ УЛЬТРАЗВУКОВЫМИ ТОЛЩИНОМЕТРАМИ С А-РАЗВЕРТКОЙ

А. Н. КОЗИН

Показано, что на рынке приборов ультразвукового контроля появился и продолжает совершенствоваться новый класс приборов для измерения толщины УЗ толщинометры с А-разверткой, которые хорошо себя зарекомендовали в тех случаях, когда оператор не может надежно оценить корректность измерений. Эти приборы позволяют резко повысить производительность труда и решить ряд новых технологических задач.

It is shown, that a new class of thickness measurement instruments have been introduced in the market of UT instruments and they are being continuously improved. These are US thickness gauges with A-scan, which are very useful for those cases, when the operator cannot reliably evaluate the validity of measurements. These instruments allow a marked improvement of labour efficiency and addressing a number of process tasks.

Проблема. Операторы ультразвукового (УЗ) контроля, выполняющие измерения остаточной толщины стенки УЗ толщиномерами с цифровой индикацией в целях диагностирования технического состояния оборудования, как показано в [1, 2], часто сталкиваются с проблемами определения толщины стенки, которые возникают из-за:

- неровностей противоположной поверхности, возникающих при неравномерной, местной, точечной, язвенной или пятнистой коррозии, и вызывающих существенное уменьшение амплитуды эхо-сигналов, что может привести к критическим ошибкам измерения;
- значительной геометрической непараллельности стенок оборудования, которая также приводит к существенному уменьшению амплитуды эхо-сигналов или невозможности проведения измерений;
- включений в металле и расслоения металла, вызывающих эхо-сигналы, которые могут быть приняты за эхо-сигналы от коррозионных поражений;
- неопределенности положения границы раздела биметаллических конструкций, что приводит к росту погрешности измерений;
- невозможности проводить измерения при высокой температуре контролируемой поверхности и др.

К тому же огромные затраты средств и времени уходят на подготовку поверхности под измерения (требуется удаление защитного покрытия), протоколирование результатов измерений и пр.

Пути решения. До недавнего времени эти проблемы обычно решались путем использования УЗ дефектоскопов общего назначения в качестве приборов для измерения толщины. Это создавало значительные трудности из-за громоздкости оборудования по сравнению с цифровыми толщиномерами и более высокой погрешности измерений.

В конце 90-х годов ряд ведущих производителей оборудования для ультразвукового контроля, таких как Panametrics (США), Krautkramer (Германия), StressTel (США), Staveley (США), Sonatest (Великобритания), выпустили в продажу новый тип приборов — толщинометры с А-разверткой. Создание нового типа приборов с новыми функциональными возможностями при обеспечении не-

больших малогабаритных характеристик было обусловлено развитием микроэлектроники.

В результате созданы приборы массой около одного килограмма, которые помимо традиционного для толщинометров цифрового индикатора имеют традиционный для УЗ дефектоскопов индикатор с разверткой типа А. Это позволило наблюдать на жидкокристаллическом экране эхо-сигналы от противоположной стенки изделия или от несплошностей, имеющихся в основном металле.

Этот «гибрид» толщинометра и дефектоскопа помимо резкого повышения производительности измерения толщины позволяет при соответствующем технологическом обеспечении решать целый комплекс задач, возникающих в процессе эксплуатационного УЗ контроля остаточной толщины металла, например:

- измерять остаточную толщину металла без удаления защитных покрытий, например, слоев краски или эпоксидного покрытия и т.п., что создает большую экономию материальных, финансовых и человеческих ресурсов;
- измерять остаточную толщину металла в сложных условиях — при наличии неравномерной, язвенной и других типов коррозии;
- обнаруживать и классифицировать дефекты металла типа включение, расслоение и коррозия;
- измерять остаточную толщину металла при значительной непараллельности стенок;
- обнаруживать пятнистую коррозию и измерять остаточную толщину при ее обнаружении;
- обнаруживать и определять размеры дефектов типа несплавление наплавки и основного металла.



Толщинометр T-Scope III с А-разверткой



Сравнительные характеристики толщинометров с А-разверткой

Технические характеристики	Название, производитель, страна			
	T-Scope III, StressTel, США	Alfagage, Sonatest, Великобритания	DMS2, Krautkramer, Германия	36DL PLUS, Panametrics, США
Диапазон толщин, мм	0,25...508	0,6...500	0,66...635	0,5...500
Скорость, м/с	1000...9999	2000...9999	1000...9999	762...13999
Разрешение, мм	0,01	0,01	0,01 или 0,1	0,01 или 0,1
Усиление, дБ	Ручное — 85 (шаг 1 дБ) и автоматическое	Автоматическое — 80 Скорость изменения — 0,5 дБ/мкс	Ручное (шаг 1 дБ) и автоматическое	Ручное (шаг 1 дБ) и автоматическое
Полоса частот, МГц	0,5...22	1...75	0,5...15	1...15
Преобразователи	Раздельно-совмещенные, совмещенные	Раздельно-совмещенные, совмещенные	Раздельно-совмещенные, совмещенные	Раздельно-совмещенные, совмещенные
Дисплей	ЖКИ с подсветкой и регулировкой контрастности, 320×240 пикселей, 96×71 мм	ЖКИ с регулировкой контрастности, 128×96 пикселей, 48×71 мм	ЖКИ с подсветкой, 240×320 пикселей, 71×95 мм	ЖКИ с подсветкой, 102×86 мм
Режимы индикации	A-скан, B-скан, миним. толщина	A-скан, миним. толщина	A-скан, B-скан, миним. толщина	A-скан, B-скан, миним. толщина
Режимы представления сигнала	Отрицательная, положительная полуволна	Отрицательная, положительная полуволна, недектированный сигнал	Отрицательная, положительная полуволна, недектированный и детектированный сигналы	Отрицательная, положительная полуволна, недектированный и детектированный сигналы
Стробы	2 регулируемых строба	2 регулируемых строба	2 регулируемых строба	2 регулируемых строба
Калибровка	По 1 и 2 точкам	По 1 и 2 точкам	По 1 и 2 точкам	По 1 и 2 точкам
Коррекция V-образного хода лучей	Да	Да	Да	Да
Режим замораживания	Да	Да	Да	Да
Память	40000 замеров толщины, 1000 A-сканов, 20 настроек	8000 замеров толщины, 2 500 A-сканов, 100 настроек	150000 замеров толщины, 1100 A-сканов, 20 настроек	95 000 замеров толщины, 1750 A-сканов
Сопряжение с внешними устройствами	RS 232	Инфракрасный порт	RS 232	RS 232
Время непрерывной работы, ч	60	9	40	Нет данных
Рабочая температура, °C	-10...+50	-10...+55	-10...+55	-10...+55
Габариты, мм	191×140×56	285×120	256×129×30	238×138×38
Масса (с батареями), кг	1,14	0,88	0,725	0,95
Гарантия, лет	2	Нет данных	2	2
Представительство в Украине	Да	Нет	Да	Нет

Также толщинометры этого класса работают с УЗ преобразователями совмещенного типа, что позволяет:

- измерять толщину стенки металлов с высоким затуханием УЗ колебаний (нержавеющие стали, никелевые стали, цветные металлы и т.п.);
- измерять толщину стенки нагретых металлов при использовании преобразователей с высокотемпературной линией задержки;
- измерять толщину стенки металла от 0,25 мм при использовании высокочастотных совмещенных преобразователей с линией задержки.

Нормативная база. Большинство перечисленных технологических задач рассматриваются в проекте Европейского стандарта prEN 14127:2001 «Неизрушающий контроль — Ультразвуковые измерения толщины» [3]. В стандарте приведены конкретные рекомендации по применению толщинометров с А-разверткой. Например, в пункте **6.4 Выбор прибора** указывается, что:

Рекомендуется использовать приборы с отображением А-развертки, потому что:

- выбор и оценка эхо-сигналов возможна только при наличии графического дисплея;
- универсальные ультразвуковые приборы в большинстве случаев имеют более высокую мощность, чем малогабаритные толщинометры;
- универсальные ультразвуковые приборы в большинстве случаев имеют более высокую чувствительность, чем малогабаритные толщинометры;
- универсальные ультразвуковые приборы в большинстве случаев имеют более широкий диапазон частот, чем малогабаритные толщинометры;
- универсальные ультразвуковые приборы могут работать в различных модах (режимах) измерения толщины: с совмещенными и раздельно-совмещенными преобразователями, с непосредственным контактом или через линии задержки,

с отображением недетектированного сигнала или различными режимами детектирования сигналов.

В **Приложении А** проекта стандарта «Механизмы коррозии в сосудах и трубопроводах» приведены рекомендации по измерению общей и питтинговой коррозии.

Методика А.1. Измерение общей коррозии. При общей коррозии могут применяться приборы с цифровым дисплеем. Если цифровой прибор не дает реальных показаний из-за трудных условий поверхности, включений в материале или сильного поглощения покрытиями, должен использоваться прибор с А-разверткой.

Если измеряемые поверхности имеют покрытия и требуется вычитание толщины покрытия из общего результата, должны использоваться соответствующие цифровые толщиномеры или толщиномеры с А-разверткой.

Когда требуется найти точки с наименьшей толщиной внутри исследуемой зоны, применяется сканирование. Для этой цели используются приборы с А-разверткой.

Естественно, для обнаружения и измерения питтинговой коррозии также рекомендуется применение толщиномера с А-разверткой. Этой проблеме посвящен параграф *Методика А.2. Измерение коррозии с питтингами*.

Аппаратные возможности. Аппаратные возможности толщиномеров с А-разверткой значительно отличаются от традиционных толщиномеров. Ручное регулирование усиления дает возможность повысить вероятность и точность измерения толщины в сложных случаях, к которым необходимо отнести большую неравномерность отражающей поверхности и шероховатость поверхности ввода УЗ колебаний, наличие отражателей и рассеяния внутри металла, непараллельность поверхности ввода и отражающей поверхности и т.п.

В режиме «Минимальная толщина» отображается минимальная толщина при сканировании участков поверхности объекта контроля, что особенно удобно при контроле коррозии: традиционная схема измерения толщины в случайно выбранных дискретных точках не гарантирует от пропуска участков с коррозионными поражениями между этими точками.

В толщиномерах, имеющих режим «В-сканирование», получают профиль контролируемого участка, который наглядно иллюстрирует состояние поверхности (а также наличие акустического контакта) и наличие дефектов на недоступной поверхности или внутренних дефектов.

Использование режима «Автокалибровка» позволяет снизить зависимость результатов измерений от субъективного воздействия оператора на результаты контроля. Также для этого и для существенного повышения производительности измерений направлена возможность вызова из памяти данных об ультразвуковом преобразователе или набора настроек толщиномера.

Возможность хранить и регистрировать большой объем результатов измерений и специализированное программное обеспечение, работающее в операционной среде Windows, позволяет автома-

тизировать процесс представления и анализа результатов контроля и подготовку протокола о выполненных измерениях. В протокол, обычно автоматически вносятся режимы контроля, дата, время, тип преобразователя и т.п., что существенно увеличивает производительность оператора при переводе данных в компьютер, анализе результатов контроля и составлении отчета о проведенных измерениях толщины.

Эти толщиномеры позволяют автоматически учить погрешность измерений, вызываемую разностью путей УЗ колебаний на малой толщине при работе с раздельно-совмещенным преобразователем, что существенно повышает точность измерений при толщине менее 5 мм.

Толщиномеры этого класса обычно имеют жидкокристаллический графический дисплей высокого разрешения с регулируемой контрастностью и подсветкой, что позволяет видеть результаты измерений и изображение экрана как при ярком солнечном свете, так и при плохом освещении.

В приведенной таблице представлены технические характеристики УЗ толщиномеров с А-разверткой некоторых наиболее известных фирм-производителей.

Ситуация на рынке. Большинство технических характеристик, представленных в таблице, имеет близкие параметры, что обеспечило толщиномерам с А-разверткой примерно равные с этой точки зрения стартовые позиции при выходе на рынок. При этом бесспорное преимущество имелось у хорошо известных в Украине торговых марок Panametrics и Krautkramer, которое почти полностью нивелировалось отсутствием необходимых для этого финансовых средств у желающих приобрести эти приборы.

Толщиномеры с А-разверткой фирм Panametrics и Krautkramer относятся к высшей ценовой категории, так как их цена у производителя достигает 4000 и более американских долларов за прибор без преобразователей. Толщиномер компании Sonatest занимает промежуточную позицию, а толщиномер T-Scope III компании StressTel является наиболее конкурентным по этому показателю: его цена почти вдвое меньше, чем цена толщиномеров фирм Panametrics и Krautkramer.

При этом следует особо отметить, что компания StressTel выпускает уже второе поколение этих приборов, что позволило разработчикам внести ряд изменений в конструкцию толщиномера на основании пожеланий непосредственных потребителей. Например, пришлось отказаться от конструкции корпуса типа «ракетка», поскольку при такой конструкции руки оператора постоянно заняты, что во многих случаях может быть недопустимо, а также был существенно увеличен размер экрана и увеличена его разрешающая способность. К достоинствам этого прибора следует отнести наличие русскоязычного интерфейса графического дисплея с подсказками для настройки, инструкцию по эксплуатации на русском языке и большой выбор УЗ преобразователей для различных применений, например, измерения толщины пластмасс от 0,125 мм, что необходимо при изготовлении различных емкостей, и сталей от 0,25 мм в случае



измерения турбинных лопаток, а также решения множество других задач, когда необходимо знать реальную толщину объекта контроля.

Выводы

Как показывает представленный краткий анализ, на рынке приборов УЗ контроля появился и продолжает совершенствоваться новый класс приборов для измерения толщины, которые хорошо себя зарекомендовали в тех случаях, когда оператор не может надежно оценить корректность измерений. Эти приборы позволяют резко повысить производительность труда и решить целый ряд новых технологических задач.

Быстрое развитие в секторе измерения толщины стимулировало разработку нового Европейского стандарта prEN 14127:2001 «Неразрушающий контроль — Ультразвуковые измерения толщины», в котором большое внимание уделено применению именно УЗ толщиномеров с А-разверткой.

ЧП «ДП-Тест»,
Киев

При этом необходимо учитывать, что переход от цифровых толщиномеров к толщиномерам с А-разверткой потребует существенного повышения квалификации операторов, выполняющих измерения толщины.

Дополнительную информацию по измерению толщины металлов и неметаллов с использованием толщиномеров с А-разверткой можно получить по следующему адресу: ДП-Тест, 04050, Киев, а/я 50. Тел./факс: (044) 247 6718, тел.: (044) 495 1145, E-mail: kozin@ndt-ua.com

1. Краутрамер Й., Краутрамер Г. Ультразвуковой контроль материалов. Справочник. — М.: Металлургия, 1991.
2. Заплотинский И. А. О проведении технического диагностирования объектов котлонадзора в энергетике. — Мат. Десятой юбил. междунар. конф. и выставки «Современные методы и средства НК и ТД», г. Ялта. — 2002.
3. PREN 14127:2001 Non-destructive testing — Ultrasonic thickness measurement, 34 p.

Поступила в редакцию
12.04.2003

Компьютерное проектирование и подготовка производства сварных конструкций: Учеб. пособие для вузов / С. А. Куркин, В. М. Холов, Ю. Н. Аксенов и др.; Под ред. С. А. Куркина, В. М. Холова. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. — 464 с.



Рассмотрены примеры эффективного использования компьютерных технологий на всех этапах подготовки производства сварных конструкций, начиная от расчета и проектирования самих конструкций до моделирования работы сварочных роботизированных технологических комплексов.

Содержание учебного пособия соответствует программам курсов лекций по компьютерным технологиям сварочного производства, которые авторы читают в МГТУ им. Н. Э. Баумана и других вузах.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки дипломированных специалистов «Машиностроительные технологии и оборудование» по специальности «Оборудование и технология сварочного производства». Может быть полезно руководителям подразделений промышленных предприятий.

Более подробно с книгой можно ознакомиться в библиотеке ИЭС им. Е. О. Патона.



МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ДВОЙНЫХ ДЕФЕКТОВ ТИПА КОРРОЗИОННЫХ РАКОВИН

А. П. ГУСЕВ, С. А. КОСОВЕЦ

Выполнено теоретическое исследование влияния продуктов коррозии в полости дефектов на магнитное поле рассеяния. Получены в линейном приближении аналитические выражения составляющих напряженности магнитного поля рассеяния двух сферических дефектов типа раковин с учетом их магнитного взаимодействия, а также с учетом слоя продуктов коррозии в полости дефектов. Показано, что наличие продуктов коррозии в полости дефектов может уменьшать напряженность поля рассеяния более чем в два раза, что при оценке размеров дефектов может привести к погрешности до 30 %.

A theoretical study has been conducted of the influence of corrosion products in the defect cavity on the magnetic dissipation field. Analytical expressions in linear approximation were derived for the components of intensity of dissipation magnetic field of two spherical defects of blowhole type, allowing for their magnetic interaction, as well as a layer of corrosion products in the defect cavity. It is shown that the presence of corrosion products in the defect cavity can decrease the dissipation field intensity by more than one time, which in evaluation of defect size may lead to up to 30 % errors.

Одним из распространенных типов дефектов являются коррозионные поражения в виде раковин, характеризующиеся разрушением металла на большую глубину и поэтому особенно опасные для находящихся под давлением котлов и трубопроводов. Продукты коррозии металла могут частично выноситься из раковин, образуя полость, а оставшиеся на стенах полости вместе с разрушающимся металлом образуют некоторый переходный слой, магнитная проницаемость которого отличается от проницаемости материала изделия. При намагничивании последнего в процессе дефектоскопии переходные слои коррозионных раковин изменяют поле рассеяния дефектов. Кроме того, коррозионные поражения, как правило, множественные или групповые, в связи с чем их магнитные поля рассеяния перекрываются, т. е. при идентификации дефектов требуется учет магнитного взаимодействия.

Для оценки влияния коррозии на поле рассеяния групповых дефектов в настоящей работе выполнен расчет составляющих напряженности магнитного поля двух сферических двухслойных включений в изотропной среде с учетом магнитного взаимодействия.

Система координат в расчетной модели (рисунок) выбрана так, что ось ОХ проходит через центры включений, пересекая их в точках x_j , а вектор напряженности $\vec{H}_0(x, y)$ двухмерного намагничивающего поля параллелен плоскости XOY. Примем следующие обозначения: R_1 и μ_1 , R_3 и μ_3 — радиусы и магнитная проницаемость соответственно наружного и внутреннего слоев первого включения ($j = 1$); R_2 и μ_2 , R_4 и μ_4 — то же для слоев второго включения ($j = 2$); μ_c — магнитная проницаемость окружающей среды; x_1 , x_2 — координаты центров включений, $x_2 = x_1 + 2b$.

В силу симметрии задачи поле рассеяния включений \vec{H} достаточно найти в плоскости XOY. При этом решение существенно упрощается, а его анализ становится наглядным, если использовать следующие два приближения: 1) магнитная проницаемость не зависит от напряженности поля ($\mu = \text{const}$); 2) действующее на каждое включение

намагничивающее поле \vec{H}_0 в объеме включения однородно, а длина и направление вектора напряженности этого однородного поля соответствуют таким же характеристикам вектора напряженности неоднородного поля в точке центра включения, т. е. $\vec{H}_{0j} = \vec{H}_0(x_j; y_j = 0)$. В этом случае для нахождения решения применим метод теории возмущений [1], основывающийся на возмущении нулевого решения, которое в соответствии с [2] и с учетом условий задачи можно записать в виде

$$\begin{aligned} H_x^{(0)} &= \sum_{j=1}^2 K_j R_j^3 (H_{0xj} A_{xj} + H_{0yj} B_j), \\ H_y^{(0)} &= \sum_{j=1}^2 K_j R_j^3 (H_{0xj} B_j + H_{0yj} A_{yj}), \end{aligned} \quad (1)$$

где H_{0xj} и H_{0yj} — составляющие напряженности намагничивающего поля \vec{H}_{0j} ;

$$\begin{aligned} A_{xj} &= \frac{2(x - x_j)^2 - y^2}{[(x - x_j)^2 + y^2]^{3/2}}, \quad B_j = \frac{3y(x - x_j)}{[(x - x_j)^2 + y^2]^{3/2}}; \\ A_{yj} &= \frac{2y^2 - (x - x_j)^2}{[(x - x_j)^2 + y^2]^{3/2}}, \quad (x - x_j)^2 + y^2 > R_j^2; \\ K_1 &= \frac{(\mu_3 + 2\mu_1)(\mu_1 - \mu_c)R_1^3 + (\mu_3 - \mu_1)(2\mu_1 + \mu_c)R_3^3}{(\mu_3 + 2\mu_1)(\mu_1 + 2\mu_c)R_1^3 + 2(\mu_3 - \mu_1)(\mu_1 + \mu_c)R_3^3}, \\ K_2 &= \frac{(\mu_4 + 2\mu_2)(\mu_2 - \mu_c)R_2^3 + (\mu_4 - \mu_2)(2\mu_2 + \mu_c)R_4^3}{(\mu_4 + 2\mu_2)(\mu_2 + 2\mu_c)R_2^3 + 2(\mu_4 - \mu_2)(\mu_2 + \mu_c)R_4^3}. \end{aligned} \quad (2)$$

Учет возмущающего действия одного включения на другое в первом приближении может быть получен заменой \vec{H}_{0j} в формулах (1) на $\vec{H}_{0j} + \vec{H}_{ij}^{(0)}$, во втором приближении — заменой на $\vec{H}_{0j} + \vec{H}_{ij}^{(1)}$ и т. д., где \vec{H}_{ij} — напряженность магнитного поля i -го включения в точке центра j -го включения (i и j принимают значения 1 и 2 при $i \neq j$). Выполнение процедуры итераций приводит к следующему решению:



$$\begin{aligned}
 H_x &= C_1 \sum_{j=1}^2 \left[H_{0xj} + 2K_i \left(\frac{R_i}{2b} \right)^3 H_{0xi} \right] K_j R_j^3 A_{xj} + \\
 &\quad + C_2 \sum_{j=1}^2 \left[H_{0yj} - K_i \left(\frac{R_i}{2b} \right)^3 H_{0yi} \right] K_j R_j^3 B_j, \\
 H_y &= C_1 \sum_{j=1}^2 \left[H_{0xj} + 2K_i \left(\frac{R_i}{2b} \right)^3 H_{0xi} \right] K_j R_j^3 B_j + \\
 &\quad + C_2 \sum_{j=1}^2 \left[H_{0yj} - K_i \left(\frac{R_i}{2b} \right)^3 H_{0yi} \right] K_j R_j^3 A_{yj}, \tag{3}
 \end{aligned}$$

где

$$C_1 = \left[1 - \frac{4K_1 K_2 R_1^3 R_2^3}{(2b)^6} \right]^{-1}; \quad C_2 = \left[1 - \frac{K_1 K_2 R_1^3 R_2^3}{(2b)^6} \right]^{-1};$$

$$i = \begin{cases} 1 & \text{при } j = 2; \\ 2 & \text{при } j = 1; \end{cases} \quad 2b = |x_1 - x_2|.$$

Из формул (3) видно, что первое слагаемое в квадратных скобках относится к нулевому решению, а второе — к случаю влияния одного включения на другое. Однако влияние не ограничено только вторыми слагаемыми: взаимодействие включений характеризуется также коэффициентами C_1 и C_2 , которые в зависимости от магнитной проницаемости включений и окружающей среды могут быть больше, равны или меньше единицы. Равенство единице коэффициентов C_1 , C_2 (отсутствие взаимодействия) может быть в случае равенства нулю хотя бы одного из коэффициентов K_j (например, при $\mu_2 = \mu_4 = \mu_c$), что эквивалентно отсутствию второго включения. Однако магнитного взаимодействия может не быть и при наличии двух включений, если хотя бы у одного из них магнитный момент одного слоя равен по значению и противоположен по направлению магнитному моменту другого слоя. При данном условии, например, для первого включения, с учетом (2) получаем

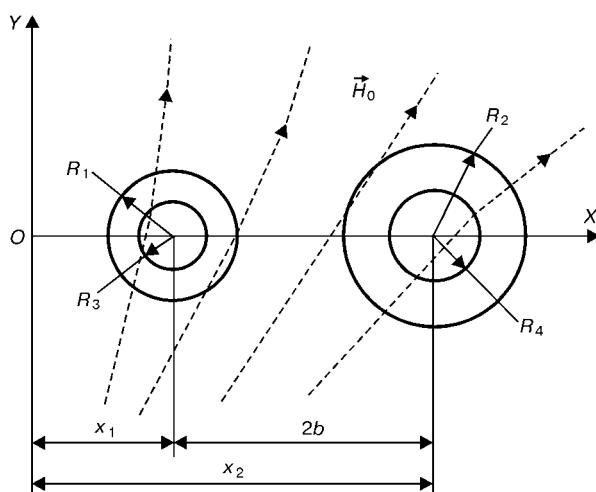


Таблица 1. Знак приращения напряженности магнитного поля

Направление вектора		I		II		III	
\vec{H}_{01}	\vec{H}_{02}	$K_1 > 0$	$K_2 > 0$	$K_1 < 0$	$K_2 < 0$	$K_1 > 0$	$K_2 < 0$
\rightarrow	\rightarrow	+	+	-	-	-	+
\uparrow	\uparrow	-	-	+	+	+	-
\leftarrow	\rightarrow	-	-	+	+	+	-
\downarrow	\uparrow	+	+	-	-	-	+

$$\frac{(\mu_1 - \mu_c)(\mu_3 + 2\mu_1)}{(\mu_1 - \mu_3)(\mu_c + 2\mu_1)} = \left(\frac{R_3}{R_1} \right)^3 \text{ при } \mu_1 > \mu_c > \mu_3 \tag{4}$$

или $\mu_1 < \mu_c < \mu_3$.

В рассматриваемой задаче о магнитном поле дефектов в ферромагнитных материалах реализуется случай $\mu_c > \mu_1$ и $\mu_3 = 1$, поэтому условие (4) не выполняется, и магнитное взаимодействие коррозионных дефектов всегда присутствует. Результат взаимодействия можно пояснить на основе принципа суперпозиции полей, который действие намагничающего поля \vec{H}_0 на включение позволяет рассмотреть отдельно по каждой из составляющих H_{0xj} и H_{0yj} . Например, из формул (3) видно, что при $H_{0y} = 0$ значение H_x определяется только первой суммой по j , а при $H_{0x} = 0$ — только второй. При этом также видно, что если знаки слагаемых в квадратных скобках совпадают, то $H_{xj}/H_x^{(0)}$ больше единицы, а если не совпадают — меньше. Первый случай можно квалифицировать как подмагничивание одного включения другим, второй — как размагничивание. Если же знаки слагаемых в квадратных скобках совпадают одновременно для двух включений, то $H_x/H_x^{(0)}$ больше единицы, а подмагничивание включений друг другом можно назвать подмагничающим взаимодействием. В противном случае, когда $H_x/H_x^{(0)}$ меньше единицы, имеем размагничающее взаимодействие. В табл. 1 приведены знаки «+» и «-», соответствующие увеличению и уменьшению напряженности поля одного включения под влиянием другого, для трех групп с различными сочетаниями коэффициентов K_j и направлений векторов H_{0xj} и H_{0yj} . К группе I относятся включения с магнитной проницаемостью $\mu_i > \mu_c$, к II — с $\mu_i < \mu_c$, а к III — включения различных типов: одно имеет $\mu_i > \mu_c$, другое — $\mu_i < \mu_c$. Стрелками указаны направления составляющих напряженности намагничающего поля \vec{H}_0 в точках x_j , y_j центров включений.

Из табл. 1 видно, что для включений групп I и II по каждой из составляющих H_{0x} и H_{0y} реализуется либо подмагничающее, либо размагничающее взаимодействие. Для включений группы III подмагничивание одного включения и размагничивание другого происходят одновременно. Дефекты типа раковин со слоем коррозии имеют $\mu_i < \mu_c$ (группа II), при этом их взаимодействие в двух случаях ($H_{0y} = 0$, $H_{0x1} < 0$, $H_{0x2} > 0$ и $H_{0x} = 0$,



Таблица 2. Зависимость напряженности магнитного поля дефектов от заполнения их полости продуктами коррозии

R_3/R_1	$H_x/H_x^{(0)}$				$H_x(R_3/R_1)/H_x(R_3 = R_1)$			
	$H_{0x} = 0$		$H_{0y} = 0$		$H_{0x} = 0$		$H_{0y} = 0$	
	$R_1 = b$	$R_1 = 2b/3$	$R_1 = b$	$R_1 = 2b/3$	$R_1 = b$	$R_1 = 2b/3$	$R_1 = b$	$R_1 = 2b/3$
1,0	1,18033	1,0474	0,766	0,917	1,000	1,000	1,000	1,000
0,9	1,12715	1,0346	0,816	0,9373	0,959	0,798	0,786	0,755
0,8	1,0988	1,0274	0,847	0,9494	0,745	0,632	0,651	0,609
0,7	1,0819	1,0230	0,868	0,957	0,618	0,53	0,562	0,517
0,6	1,0714	1,0201	0,882	0,962	0,539	0,465	0,502	0,458
0,5	1,0647	1,0183	0,891	0,965	0,488	0,424	0,463	0,419
0,3	1,0583	1,0166	0,901	0,968	0,440	0,383	0,424	0,380
0	1,0566	1,0161	0,903	0,969	0,427	0,372	0,413	0,370

$H_{0y1} > 0, H_{0y2} > 0$) подмагничивающее, а в двух других случаях ($H_{0y} = 0, H_{0x1} > 0, H_{0x2} > 0$ и $H_{0x} = 0, H_{0y1} < 0, H_{0y2} > 0$) — размагничивающее. Кроме приведенных в табл. 1 основных четырех случаев направлений векторов \vec{H}_{0x} и \vec{H}_{0y} , в практике могут реализоваться и комбинации этих направлений. Поэтому одновременно по одной из составляющих \vec{H}_0 может иметь место подмагничивающее, а по другой — размагничивающее, либо однотипное взаимодействие одновременно по двум составляющим.

Для количественной оценки влияния величины коррозии и магнитного взаимодействия дефектов на поле рассеяния в табл. 2 приведены результаты численного расчета составляющей H_x напряженности магнитного поля двух дефектов с различным содержанием продуктов коррозии. Расчеты представлены для конкретного случая: поле \vec{H}_0 однородно и $R_2 = R_1, R_4 = R_3, \mu_2 = \mu_1 = 10, \mu_4 = \mu_3 = 1, \mu_c = 100$. Отношение R_3/R_1 характеризует толщину слоя коррозии в полости дефекта; $H_x/H_x^{(0)}$ — отношение напряженности поля рассеяния взаимодействующих дефектов к напряженности невзаимодействующих; $H_x(R_3/R_1)/H_x(R_3 = R_1)$ — отношение напряженности поля рассеяния дефектов со слоем коррозии к напряженности поля дефектов без слоя коррозии. Результаты расчетов приведены для двух направлений намагничивающего поля $\vec{H}_0 = \vec{H}_{0x}$ и $\vec{H}_0 = \vec{H}_{0y}$ и двух расстояний между центрами дефектов.

Из табл. 2 видно, что при $\vec{H}_0 = \vec{H}_{0y}$ отношение $H_x/H_x^{(0)}$ больше единицы, а при $\vec{H}_0 = \vec{H}_{0x}$ — меньше, что соответствует подмагничивающему и размагничивающему типам взаимодействия дефектов (табл. 1, группа II). Увеличение напряженности поля рассеяния от магнитного взаимодействия де-

фектов при минимальном расстоянии между ними ($R_1 = b$) и отсутствии коррозионного слоя в полости дефектов ($R_3/R_1 = 1$) составляет 18 %, а уменьшение напряженности — примерно 23 %.

Наличие слоя коррозии внутри дефектов уменьшает изменения напряженности поля рассеяния, возникающие при их взаимодействии, что при анализе результатов в процессе дефектоскопии изделий может быть ошибочно отнесено к с уменьшенным размерам дефектов. Например, значение $H_x/H_x^{(0)} = 1,057$ при $R_1 = b$ и $R_3 = 0$ близко к значению $H_x/H_x^{(0)} = 1,047$ при $R_1 = R_3$. В этом случае реальный диаметр полости дефектов равен $2b$, а по результатам измерений магнитного взаимодействия без учета продуктов коррозии в полости дефектов диаметр полости оказывается на $1/3$ меньше. Аналогичная погрешность в оценке диаметра дефектов без учета продуктов коррозии может быть получена по результатам измерения непосредственно напряженности поля рассеяния. Так, в рассматриваемом примере (табл. 2) заполнение полости дефектов продуктами коррозии ($R_3 = 0$) приводит к уменьшению отношения $H_x(R_3/R_1)/H_x(R_3 = R_1)$ в среднем на 60 %. Уменьшенное значение $H_x(R_3/R_1)$ без учета наличия продуктов коррозии принимается за $H_x(R_3 = R_1)$, образуемого дефектами, кажущийся радиус которых меньше действительного в среднем на 27 %.

Таким образом, учет сохранения продуктов коррозии в полости дефектов является необходимым условием получения достоверных результатов дефектоскопии изделий магнитным методом.

1. Маделунг Э. Математический аппарат физики. — М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1960. — 361 с.
2. Сапожников А. Б. Теоретические основы электромагнитной дефектоскопии металлических тел. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1980. — Т. 1.



МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОМОТОРОВ С ПОМОЩЬЮ CMVA60 и CMVA55 Microlog

Microlog позволяет осуществлять анализ электрических и механических характеристик электромоторов как по измерению механической вибрации с помощью датчика-акселерометра, так и исследованием электрического сигнала, снимаемого датчиком Холла.

Microlog allows analyzing the electric and mechanical characteristics of electric motors both to measure mechanical vibrations, using sensor-accelerometer, and to study the electric signal, read by Hall sensor



Датчик-акселерометр входит в комплект поставки Microlog. Датчик-клещи типа CMSS6187-1-СЕ или CMSS6187-СЕ должен быть заказан дополнительно.

Датчик Холла, чувствительный к изменению магнитного поля, устанавливается на проводник одной из фаз питания первичной (CMSS6187-СЕ) или вторичной (CMSS6187-1-СЕ) обмоток электродвигателя. Цепь

встроенного усилителя выдает на выход датчика сигнал в милливольтах, пропорциональный току. CMSS6187-СЕ имеет диапазоны 60 и 600 А, CMSS6187-СЕ – диапазоны 20 и 200 А. Питание датчиков от батареи.

Для точного определения числа оборотов двигателя рекомендуется использовать оптический датчик фазы / оборотов типа CMSS6155K-1-W или лазерный датчик типа CMSS 6195K-1-W.

Методики, изложенные ниже, проверены на моторах мощностью от 5 до 700 л.с. Эффективный анализ состояния электромотора может быть сделан только при нагрузке, не менее 70 % от полной.

Механическая вибрация. Неравномерный зазор между ротором и статором наблюдается по величине второй гармоники сетевой частоты (100 Гц) в спектре виброскорости не зависимо от количества полюсов мотора и скорости вращения. Эмпирические данные показывают, что гармоника 100 Гц появляется при неравномерности зазора свыше 10 %. Причиной неравномерности зазора часто является наличие так называемой «мягкой лапы». Из-за неровности фундамента при установ-

ке мотора и затяжке креплений корпус мотора и статор могут быть деформированы. Microlog позволяет наблюдать спектр виброскорости в реальном времени. Для проверки влияния «мягкой лапы» при наблюдении спектра на дисплее Microlog необходимо отпустить и затянуть крепеж (болт или гайку) последовательно на каждой из опор. Если опора не стоит на фундаменте, а притянута к нему, то при ее ослаблении вторая гармоника сетевой частоты будет уменьшаться, а при затяжке – увеличиваться. При последующем ремонте машины мягкая лапа должна быть устранена .

Повреждение обмотки статора или изоляции также приводит к увеличению 100-герцовой гармоники в спектре. Место повреждения может быть определено измерением температуры на поверхности корпуса мотора. В месте повреждения температура будет на 20...30 градусов выше. Кроме того, повреждение статора приведет к появлению составляющих спектра на частоте, равной произведению (количество стержней ротора)×(скорость вращения). Так как количество стержней может достигать 40...50, для определения этих составляющих необходимо установить наблюдаемый частотный диапазон по крайней мереенным 100 частотам вращения. Количество стержней ротора должно быть точно известно, так как при наблюдении рассматривается диапазон частот, в котором также могут находиться составляющие от дефектов подшипников. Анализ необходимо проводить с высоким разрешением (3200...6400 линий) или с использованием частотной лупы «zoom». Рассмотренные выше случаи приводят к увеличению вибрации по причине неравномерности электрического поля. При отключении электропитания эти составляющие моментально исчезнут.

Для наблюдения симптомов повреждения ротора и статора надо установить на Microlog разрешение 100 линий, 0 – усреднений и максимальную частоту 2000 Гц (для ускорения цикла измерений).

Повреждения статора также можно определить по наличию гармоник частоты вращения в спектре огибающей. Нормальным уровнем амплитуды на частоте 100 Гц (двойная сетевая) считается величина 1...1,5 мм.

Боковые полосы. Для большинства вибrosигналов величина развития дефекта определяется наличием и количеством боковых полос около основной частоты. В отношении электромоторов могут наблюдаться боковые полосы у стержневой частоты: (число стержней)×(фактическую скорость вращения) на расстоянии 100 Гц (двойной сетевой



частоты). Боковые полосы могут также наблюдаться на расстоянии скольжения (номинальная частота вращения минус фактическая частота) или полюсной частоте (количество полюсов мотора \times скольжение). Для наблюдения этих полос необходимо установить разрешение на Microlog 1600 или 3200 линий. При работе в режиме Анализатор с разрешением 400 линий можно использовать частотную лупу («zoom»).

Определение неисправностей по анализу спектра тока. Этим методом определяются дефекты, приводящие в конечном счете к повышению сопротивления электрической цепи мотора: поломка стержней ротора, плохая пайка или ослабление клемм. Стандартный Microlog имеет специальную программу для анализа тока мотора — Motor Current Analysis Wizard. Данная программа работает в режиме обмена информацией с пользователем. На экран прибора пошагово выводятся рекомендации по необходимым установкам, последовательности измерений, затем — результаты измерений и заключение о состоянии мотора. Программа автоматически производит все необходимые математические вычисления.

Благодаря применению уникальных методов фильтрации вибросигнала, Microlog может быть настроен на любой частотный диапазон с максимальной частотой ниже 20 КГц. Microlog автоматически применяет анализ в увеличенном масштабе (zoom) для выбранного вблизи сетевой частоты узкого частотного диапазона. Благодаря этим свойствам становится возможным четкое разделение в спектре основного пика и боковых полос. Рекомендуется установить для шкалы амплитуды логарифмический масштаб.

Анализ проводится по наличию и величине пиков в спектре тока на боковых гармониках пика сетевой частоты (рис. 1). Пики находятся на расстоянии (скольжение \times число полюсов мотора):

$$\text{Боковая частота} = 2 \frac{n_{\text{синх}} - n_p}{n_{\text{синх}}} F = 2 \frac{s}{n_{\text{синх}}} F,$$

где $n_{\text{синх}}$ — синхронная скорость вращения электро-магнитного поля статора, равная $60F/(0,5 P)$; n_p — действительная скорость вращения ротора; P — количество полюсов; F — сетевая частота; s — скольжение.

Оценка состояния проводится по соотношению величины боковых пиков с пиком сетевой частоты, дБ: при разнице 54...60 — состояние мотора оценивается как отличное; 48...54 — хорошее; 42...48 — удовлетворительное; 36...42 — возможна поломка стержней ротора или другой дефект, приводящий к увеличению сопротивления цепи; 30...36 — множественные дефекты; меньше 30 — аварийное состояние. Эти оценки справедливы в случае, если мотор работает при нагрузке, не менее 70 % от полной.

SKF,
Киев

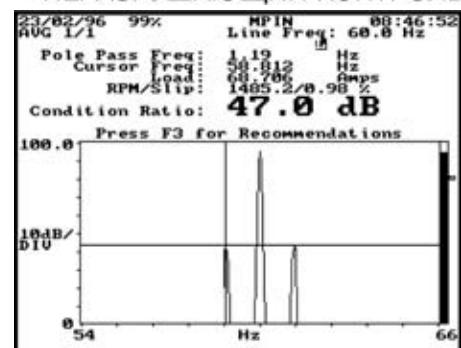


Рис. 1. Спектр тока электродвигателя

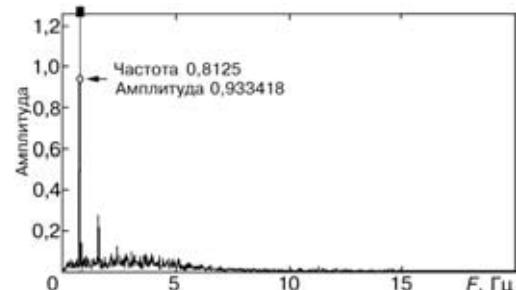


Рис. 2. Спектр огибающей тока электродвигателя

Огибающая тока мотора. При применении метода огибающей в отношении тока мотора на спектре могут наблюдаться энергетические составляющие (пики) на частоте прохождения полюсов, например, на частоте 0,8 Гц (рис. 2). В данном случае верхнюю границу частоты в спектре предлагаются установить в пределах 20...25 Гц. Оценка состояния мотора производится по соотношению величины пика на полюсной частоте к общей амплитуде. Исследования показывают, что если это отношение меньше 5 %, мотор не имеет повреждений. В рассматриваемом примере ротор имеет сломанные стержни. Отношение величины пика на частоте скольжения 0,8125 Гц к общей амплитуде составляет 63 %. Гармоники частоты скольжения являются дальнейшим подтверждением появления дефекта. Данный метод очень чувствительный и может применяться для определения дефектов на ранней стадии их развития.

Выводы

Статистика показывает, что в 20 % случаев электромоторы, находящиеся в эксплуатации, имеют дефекты, связанные с неравномерным зазором, поломкой стержней и повышенным сопротивлением на клеммах. При этом ток в обмотках при запуске мотора может превышать номинальное значение в пять-шесть раз, что может привести к аварии, остановке производства и, в конечном счете, потере продукции.

Прибор типа Microlog позволяет применить несколько различных методов для оценки механических и электрических дефектов электромоторов, что значительно повышает эффективность его применения и достоверность оценок.

Поступила в редакцию
17.04.2003

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА И БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ СВАРОЧНО-МОНТАЖНЫХ РАБОТ И ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Ю. К. БОНДАРЕНКО, А. Г. ПОТАПЬЕВСКИЙ, С. Л. ЖДАНОВ, О. В. КОВАЛЬЧУК

Описаны меры по обеспечению качества выполнения услуг по сварочно-монтажным работам, управления сварочными процессами и контроля оборудованием на предприятиях сварочного производства согласно требованиям элементов системы управления качеством ДСТУ ISO 9001-2001. Даны ссылки на конкретные нормативные документы, которые определяют требования с учетом специфики сварочного производства. Указана целесообразность проведения подтверждения соответствия сварочно-монтажных работ требованиям ДСТУ 3413-94, стандартам серии ДСТУ 3951-2000, ДСТУ ISO 9004-2-96, ДСТУ ISO 9001-2001, ДСТУ 3834.2-2001 и др. Рассмотрены проблемы сварочного производства, пути их решения, указаны стандарты для применения с целью обеспечения безопасности.

Measures on ensuring the quality of services rendered in assembly-welding operations, control of welding processes and monitoring of equipment at welding production enterprises in compliance with requirements of the DSTU ISO 9001-2001 quality management system are described. References to specific regulatory documents defining the requirements with allowance for specific features of welding production are given. The expediency of confirmation of compliance of assembly-welding operations with the requirements of DSTU 3413-94, standards of the series of DSTU 3951-2000, DSTU ISO 9004-2-96, DSTU ISO 9001-2001, DSTU 3834.2-2001 etc. is indicated. The problems of welding production and ways of their solving are considered, and standards to be applied to ensure safety are indicated.

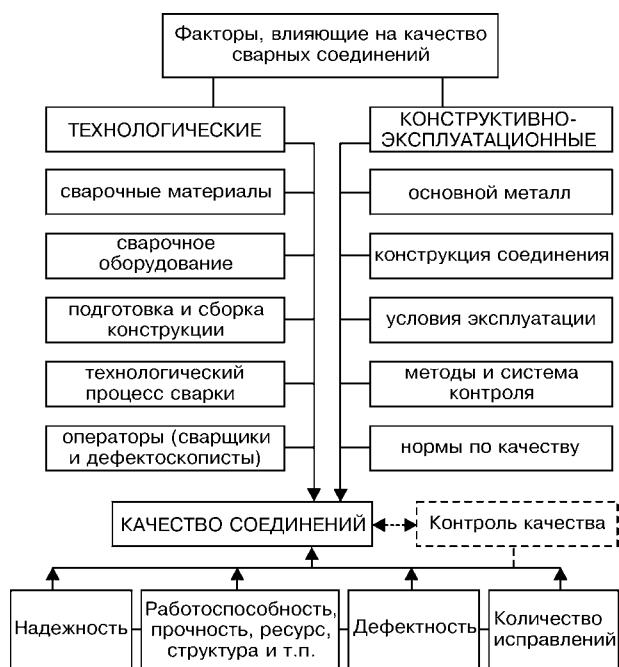
Согласно Указу Президента Украины №113 / 2001 от 23.02.2001 г. перед производителями поставлена задача повышения качества товаров, работ и услуг, снижения непроизводительных затрат за счет применения эффективных и результативных методов и систем управления качеством на производстве согласно стандартам серии ISO 9000 с целью повышения конкурентоспособности продукции.

Надежность и безопасность при эксплуатации сварных конструкций в значительной мере зависят от качества выполнения монтажных и сварочных работ. Производитель, выполняющий сварку, резку, неразрушающий контроль и техническое диагностирование (НК и ТД) при монтаже и сборке, выполняет *техническую услугу*, т. е. выступает поставщиком технической услуги, что определено в Государственном классификаторе продукции и услуг ДК 016-97 (код ДКПП-74.30.15, 45.21.31, 45.21.31.300, 25.24.9).

Перед поставщиком технической услуги постоянно возникает проблема планирования и внедрения в производство мероприятий по обеспечению качества и безопасности работ по монтажу, сварке и контролю. При этом возникает необходимость обеспечения качества не только сварной конструкции (следствия услуги), но и управления качеством внутренней деятельности поставщика – процессом выполнения работ (сварочно-монтажных) с надлежащим уровнем безопасности и охраны труда (рисунок). Определенную помощь в работе по организации системы управления качеством и выполнения безопасности услуг предоставляет исполнителю стандарт [8], который устанавливает требования обязательные и рекомендованные. Для обеспечения возможности организации качественно и безопасно выполнять сварочно-монтажные работы необходимо построить систему управления качеством, которая отвечает принципам, изложенным в стандартах серии ДСТУ ISO 9000-2001 [3–5],

требованиям нормативных документов и законов Украины «О защите прав потребителей», «Об охране труда» и др.

К обязательным требованиям выполнения сварочно-монтажных работ (услуг), которые гарантировано обеспечат основные права и интересы Потребителя (Заказчика) относят требования безопасности при сварке, НК и ТД [23]. Эти требования определяются показателями, к которым относятся нормы допустимой опасности, устанавливаемые таким образом, чтобы обезопасить персонал при изготовлении и последующей эксплуатации сварной конструкции, а также ограничить вредное влияние на окружающую среду. К этим показателям относятся нормы электро- и взрывобезопасности, пожарной безопасности, требования к средствам за-



щиты сварщиков, дефектоскопистов и другого персонала, которые определяются стандартами [1, 9–13, 15] и др.

Кроме обязательных, устанавливаются рекомендованные требования в зависимости от среды предоставления технических услуг и специфики эксплуатации сварной конструкции.

Требования к качеству выполнения технической услуги (сварочно-монтажных работ) включают также оценивание качества конечного результата, определяемое номенклатурой требований. Для сварки – это показатели механических, химических свойств, коррозийной стойкости, надежности конструкции и др., которые определяют путем испытаний образцов-свидетелей при выполнении технологического процесса [7]. Требования к выполнению работ как к технологическому процессу содержат также требования к оснастке, инструменту, компетентности рабочих, к соответствию материалов, которые используются при сварке и контроле продолжительности технологических циклов, процедурам сварки и контроля, ресурсосбережению и установленному уровню обслуживания объекта Заказчика.

При ремонте и изготовлении ответственных сварных конструкций основными опасными факторами являются: сварочные аэрозоли; повышенная запыленность и загазованность воздуха рабочей зоны; повышенная температура поверхности оснастки, шлаковой ванны, материалов и воздуха рабочей зоны; повышенное напряжение в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека; повышенные уровни электромагнитного и ионизирующего излучений, ультрафиолетовой и инфракрасной радиации; повышенная яркость света дуги; движущиеся машины и механизмы; физические и нервно-психические перегрузки; повышенная или пониженная ионизация воздуха рабочей зоны [1, 24].

Использование сварочного оборудования, которое не удовлетворяет возрастающим требованиям качества, безопасности и охраны труда потребителя [1, 19] не обеспечивает получения качественных сварных швов и безопасного выполнения сварочно-монтажных работ в условиях повышенной влажности, монтажа и ремонта, при выполнении работ на открытых площадках.

Особенно важно учесть, что в начальном и конечном участках сварных швов конструкции, а также в зонах перекрытия швов существует максимальная возможность образования дефектов типа несплавлений, трещин, шлаковых включений и т. п.

Значительная часть отечественного сварочного и контрольного оборудования, которое до сих пор выпускается, не обеспечена устройствами программирования параметров технологического процесса, которое гарантирует качественное выполнение начала и конца работ. Поэтому при монтаже ответственных конструкций необходимо использовать современное специальное сварочное оснащение, чтобы обеспечить высококачественное начало шва, а в конце полную заварку кратера. Также отсутствуют ампер- и вольтметры, которые обеспечивают контроль за режимами выполнения технологичес-

ких процессов сварки согласно WPS (технологических инструкций для сварки) [6, 21].

Необходимо отметить, что действующие в Украине стандарты [14, 16, 19], содержат перечень требований, которые определяют технологические, сварочно-технологические (функциональные) свойства и качество сварочного оборудования.

Принятая в Украине система подтверждения соответствия (закон «О подтверждении соответствия») помогает обеспечить оценку сварочно-технологических показателей, безопасность сварочного и контрольного оборудования при его использовании [2, 15, 19] в условиях сварочно-монтажных работ.

При выполнении работ в условиях повышенной опасности для гарантии безопасности исполнителя работы необходимо применять аттестованное (сертифицированное) сварочное оборудование, обеспечивающее напряжение холостого хода до 12 В, и выполнять прочие требования безопасности согласно стандарту [1].

Испытание и оценку качества сварных конструкций по обязательным требованиям безопасности и сварочно-технологическим свойствам сварочного оборудования, а также соответствия выполнения сварочно-монтажных работ проводят аккредитованные испытательные лаборатории Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины совместно с Научно-техническим центром «СЕПРОЗ» НАН Украины. Эта работа выполняется согласно требованиям нормативных документов (НД) Госнадзорохрантура Украины, Госстандарта Украины и «Перечня показателей качества функциональных свойств сварочного оборудования», который разработан с учетом международных и национальных требований [1, 15, 19, 21] и согласован с Обществом сварщиков Украины, Комитетом ТК-44 «Сварка и родственные процессы» и с Межгосударственным Советом по сварке.

Оценка проводится путем предварительной сварки образцов и оценки стабильности процесса, качества начала и окончания сварки, уровня дефектности швов (трещин, пор, несплавлений и др.) в соответствующих условиях монтажа. Необходимые испытания контрольных образцов проводятся в аккредитованных испытательных лабораториях Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины [24].

При положительных результатах испытаний и оценке соответствия Потребителю выдается государственный «Сертификат соответствия» согласно требованиям законов Украины. Опыт свидетельствует, что наличие оценки соответствия с учетом сварочно-технологических показателей качества оборудования помогает производителю сварочно-монтажных работ обеспечить качество сварочного оборудования и технологического процесса, и в результате получить качественные сварные швы и обеспечить безопасное выполнение работ на объекте.

Нарушение процесса сварки значительно влияет на качество и стоимость конструкций. При выполнении услуг по сварочно-монтажным работам основной составной выступают технологические процессы сварки и контроля. Важно, чтобы сварка

выполнялась наиболее эффективно и на всех стадиях процесса постоянно осуществлялся технологический контроль на соответствие WPS. Требования к форме технологической инструкции для сварки определены в стандарте [6], который является одним из серий принятых в Украине стандартов ISO 9956:1995 «Технические условия и процедура подтверждения соответствия технологических процессов сварки металлических материалов». Они устанавливают правила и порядок оценки соответствия качества и испытаний технологических процессов сварки неразрушающими и разрушающими методами для обеспечения эксплуатационных свойств сварных соединений. Наиболее широко в международной практике используется схема, которая предусматривает предварительное испытание технологических процессов на контрольных образцах [7], и оценку ее соответствия независимой третьей стороной согласно международным требованиям. Для ультразвуковой диагностики и радиационной дефектоскопии действуют ГОСТ 20415–82, ГОСТ 20426–82, ГОСТ 14782–86, ГОСТ 7512–82.

Опыт выполнения работы по испытанию технологических процессов, услуг сварки и контроля с целью «подтверждения их соответствия» [7, 15] и следующей сертификации по [2], накоплен в Технопарке «Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины». Созданные и аккредитованные испытательные лаборатории (технологических процессов сварки, неразрушающего контроля, механических испытаний, коррозийной стойкости и др.) действуют согласно разрешению № 055.ПР.97 и приказу Госнадзорохранруды Украины (№ 140 от 10.07.1998 г.). Они проводят работы по легализации сварочных процессов и процессов контроля, которые используются при монтаже объектов повышенной опасности.

Для дальнейшего развития процедур обеспечения установленного качества и безопасности в дальнейшем необходимо вводить в действие на предприятиях Украины систему, описанную государственным стандартом, гармонизированным с ISO 3834-2001 «Требования к качеству сварки» [9]. Это позволит обеспечить монтажно-сварочные работы полноценной системой управления качеством международного уровня, а организации и фирмы — достаточным уровнем безопасности и охраны труда на объектах строительства или ремонта конструкций.

1. ДСТУ 2456–94. Зварювання дугове та електрошлакове. Вимоги безпеки.
2. ДСТУ 3413–96. Система сертифікації УкрСЕПРО. Порядок проведення сертифікації продукції.
3. ДСТУ ISO 9000–2001. Системи управління якістю. Основні положення і словник.
4. ДСТУ ISO 9001–2001. Системи управління якістю. Вимоги
5. ДСТУ ISO 9004–2001. Системи управління якістю. Наступні щодо поліпшення діяльності.
6. ДСТУ 3951.2–2000 (ISO 9956-2:1995). Технические условия и процедура подтверждения соответствия технологических процессов сварки металлических материалов. Технологическая инструкция для сварки.
7. ДСТУ 3951.3–2000 (ISO 9956-3:1995). Технические условия и процедура подтверждения соответствия технологических процессов сварки металлических материалов. Часть 3. Испытания технологических процессов дуговой сварки сталей.
8. ДСТУ 3979–95. Стандартизация услуг. Основные положения.
9. ДСТУ ISO 3834.2–2001. Вимоги до якості зварювання. Зварювання плавленням металевих матеріалів. Частина 2. Всебічні вимоги до якості.
10. ГОСТ 12.1.004–79 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования.
11. ГОСТ 12.3.004–75 ССБТ. Термическая обработка металлов. Общие требования безопасности.
12. ГОСТ 12.3.003–86 ССБТ. Работы электросварочные. Требования безопасности.
13. ГОСТ 12.4.035–78 ССБТ. Щитки защитные лицевые для электросварщиков. Технические условия.
14. ГОСТ 95–77. Трансформаторы однофазные однопостовые для ручной дуговой сварки. Общие технические условия.
15. ГОСТ 3242–79. Соединения сварные. Методы контроля качества.
16. ГОСТ 18130–79. Полуавтоматы для ручной дуговой сварки. Общие технические условия.
17. ГОСТ 20415–82. Контроль неразрушающий. Методы акустические. Общие положения.
18. ГОСТ 20426–82. Контроль неразрушающий. Методы дефектоскопии радиационные. Область применения.
19. ГОСТ 25616–83. Источники питания для дуговой сварки. Методы испытания сварочных свойств.
20. ISO 5817:1992. Arc welded joint in steel: guidance on quality level for imperfection. Соединения сталей дуговой сваркой. Руководство по уровню качества по количеству дефектов.
21. IEC 60974-1: 1998. Arc welding equipment. Part 1. Welding power source. Оборудование для дуговой сварки. Источники питания.
22. Лобанов Л. М. Бондаренко Ю. К. Илющенко В. М., Жданов С. Л. Сертификация (аттестация) технологических процессов сварки. — Охрана труда. — 1999. — № 5. — 49 с.
23. Бондаренко Ю. К. Ковальчук О. В. Бондаренко А. Ю. Забезпечення якості та виконання технічних послуг з неурядинивого контролю та технічної діагностики — головна проблема управління якістю при виготовленні, експлуатації, та ремонті зварних конструкцій. — Техн. діагностика и неразруш. контроль. — 2000. — № 4. — С. 60–66.
24. Потапьевский А. Г., Бондаренко Ю. К. Зварювання — справа непроста і небезпечна. — Охорона праці. — 2000. — № 4. — С. 3.

Ін-т електросварки им. Е. О. Патона НАН України,
ГП НТЦ "СЕПРОЗ" НАН України,
Київ

Поступила в редакцию
24.02.2003



8-я МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ЛЕОТЕСТ-2003» В СЛАВСКОМ

А. Л. ШЕКЕРО

С 17 по 22 февраля в пос. Славское Львовской области состоялась 8-я Международная научно-техническая конференция «ЛЕОТЕСТ-2003. Физические методы и средства контроля сред, материалов и изделий». Основным организатором конференции традиционно являлся Центр «Леотест-Медиум» (директор — канд. техн. наук В. Н. Учанин). Соорганизаторами выступили Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики, Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко НАН Украины, Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Киевский НИИ судебных экспертиз, НПФ «Зонд», НПФ «Ультракон-сервис». В конференции приняли участие более 60 специалистов из Украины, России, Польши.

Открыл конференцию директор Центра «Леотест-Медиум» В. Н. Учанин. От имени организаторов он поприветствовал участников конференции и пожелал им успешной работы. Далее был заслушан доклад от Украинского общества НК и ТД, в котором автор этих строк рассказал присутствующим о направлениях деятельности УО НКТД и отчитался о работе Общества в 2002 г.

На конференцию было подано 59 докладов. Следует отметить традиционно высокий научный уровень конференции. И это не случайно. Организаторы высоко держат планку отбора докладов для конференции. Благодаря этому, сборник трудов конференции зарегистрирован в ВАК. На конференции был заслушан 31 научный доклад, которые представили:

Н. Н. Егоров, ЛЭТИ, г. Санкт-Петербург. Электроакустический тракт системы контроля качества акустического контакта блока искателей рельсового дефектоскопа.

В. И. Загребельный, ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, г. Киев. Совместное использование визуально-оптического и вихревокового методов



Ведут заседание конференции канд. техн. наук В. Н. Учанин и проф. О. М. Карпаш

НК для оценки дефектности элементов конструкций.

В. Д. Погребенник, ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАНУ, м. Львів. Підвищення вірогідності ультразвукового контролю виробів у вигляді тіл обертання.

В. В. Чистяков, Асоціація «Тестрон», г. Санкт-Петербург. Портативная рабочая станция для ультразвукового контроля сварных швов.

G. Starzynski, Институт прикладных проблем техники Польской АН, г. Варшава. Изменение остаточных напряжений в поверхностном слое при многократном кручении и растяжении.

В. М. Учанин, ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАНУ, м. Львів. Дослідження вихрострумових методів оцінки глибини довгих тріщин в феромагнітних матеріалах.

P. M. Джала, ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАНУ, м. Львів. Обстеження підземних трубопроводів апаратугою БІТ-КВП та ОРТ+В2.

С. А. Беженов, ЗНТУ, г. Запорожье. Сравнительный анализ кинетики деформирования сплава никеля в процессе монотонного нагружения и роста усталостной трещины.

А. П. Любченко, ГП «Завод им. Малышева», г. Харьков. Неразрушающий контроль глубины лазерной закалки деталей тепловозных двигателей.

Я. А. Середницький, «УкрСЕПРОтрубоізол», ФМІ НАНУ, м. Львів. Матеріалознавчо-технологічні та експлуатаційні аспекти працездатності поліуретанових електроізоляційних компаундів.

P. A. Воробель, ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАНУ, м. Львів. Комп'ютеризованая система контроля параметров профилю резьбы.

С. Лукьянец, Институт физики НАНУ, г. Киев. Расчет магнитного поля, рассеянного поверхностью дефектом в ферромагнетике. Метод интегральных уравнений.



Фото на память после закрытия конференции



ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ

A. A. Снарский, НТУ «КПИ», г. Киев. Эффективные свойства магнитных композитов.

K. Pelic, г. Ланкут, Польша. Система обеспечения качества QS-9000 в резьбовых изделиях, производимых фирмой SRUBEX S. A.

B. Г. Рибачук, ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАНУ, м. Львів. Механізм виникнення похибок у фазових вихрострумових вимірювачах електропровідності зрівноважувального перетворення.

L. П. Телепко, ДГТУ, г. Днепродзержинск. Комплексная диагностика состояния производственных зданий и сооружений.

D. Н. Козин, НТЦ РП НТК «Институт монокристаллов» НАНУ, г. Харьков. Критерии и требования к «сэндвич» детекторам для мультиэнергетической цифровой радиографии.

B. Ф. Гамалий, КГТУ, г. Кировоград. Построение системы высокочувствительного газового мониторинга на основе лазерной спектроскопии.

I. I. Робур, Киевский НИИ судебных экспертиз. Классификация голограмических защитных элементов.

G. Р. Богапов, Київський НДІ судових экспертиз. Теоретичне обґрунтування магніонного кристалу з електричним керуванням.

Отрадно, что после длительного периода оттока молодых кадров, в теорию неразрушающего контроля вновь начался прилив свежих сил: шесть докладов на конференции были сделаны недавними выпускниками и еще студентами профильных кафедр вузов.

D. В. Галаненко, НПФ «Ультракон-сервис», г. Киев. Многоканальный компьютерный дефектоскоп — производительность, надежность, документирование результатов контроля.

C. В. Прохоренко, НУ «Львівська політехніка». Розподіл температури та акустично-емісійний контроль міцності у процесах електронагляду сталової арматури.

A. В. Горошко, Технологічний ун-т Поділля, м. Хмельницький. Методи і засоби акустико-емісійної діагностики технічного стану деталей і вузлів машин.

B. В. Векерик, ІФНТУНГ, м. Івано-Франківск. Вимірювання товщини акустичним методом при високих температурах.

M. О. Карпаш, ІФНТУНГ, м. Івано-Франківск. Нейронні мережі для контролю структури газорідинного потоку.

P. В. Єрмоленко, УАЦ по НК, Нац. ун-т ім. Т. Г. Шевченка, м. Київ. Розробка 3-вимірної моделі вихрострумового контролю теплообмінних трубок парогенераторів реакторів типу ВВЕР.

Традиционно для этой конференции докладчик не ограничивался во времени. Поэтому все докладчики имели возможность дать всесторонний обзор проблемы, рассказать о целях и методах исследований, полученных результатах и их практическом применении, а все желающие — задать вопросы и получить ответы на них. Таким образом, заседания

по добной воле их участников проходили до самого ужина. А оставшиеся вопросы обсуждались утром «на бугеле».

Заседания конференции вели В. Н. Учанин, проф. О. М. Карпаш (ИФНТУНГ), В. Г. Рыбачук (ФМИ им. Г. В. Карпенко НАНУ).

В завершение конференции В. Н. Учанин представил организаторов конференции, поблагодарил ее участников, пригласил всех на 4-ю Национальную конференцию по НК в Киев (19–23 мая 2003 г.) и на очередную зимнюю конференцию в Славское, которая состоится ровно через год.

Параллельно с заседаниями конференции, в холле конференц-зала работала выставка средств неразрушающего контроля, в которой традиционно приняли участие: НПФ «Ультракон-Сервис», НПФ «Промпрылад» (с докладом о новых разработках этих фирм на одном из заседаний конференции выступил А. Никоненко — представитель коллектива разработчиков приборов), НПП «Интерон-СЭТ», ООО «Индустрия-Сервис», Центр «Леотест-Медиум», ФМИ им. Г. В. Карпенко НАНУ, фирма «Шерл».

Отчет о конференции будет не полным, если не рассказать о месте, где проходила конференция.

Небольшой курортный пос. Славское расположено в живописной долине горных рек Опир и Славка на высоте 501 метр над уровнем моря. Землю эту, окруженную невысокими горами, местные жители называют Бойковщиной, а себя бойками. Неповторимая прелест горного пейзажа, мягкий климат, целебные источники, увлекательная возможность санного и лыжного катания — все это привлекало сюда туристов еще в начале прошлого века.

Славское — сказочный уголок украинских Карпат — красив и летом и зимой, но известен, прежде всего, как центр горнолыжного спорта. В Славском проложено несколько горнолыжных трасс европейского значения. Самая высокая гора близ Славского — Тростян. Вершина ее находится на высоте 1236 м над уровнем моря.

Быть в Славском и ни разу не встать на лыжи, чтобы спуститься с горы, невозможно. Когда стоишь и с восхищением смотришь, как мимо, закладывая красивые виражи, проносятся лыжники, поневоле завидуешь их полету по снежным склонам. Поэтому день для многих участников конференции начинался с утренней зарядки на лыжах. Несколько спусков на горных лыжах с заснеженных вершин Славского заряжали положительной энергией на весь рабочий день. Кроме того, во время ожидания и непосредственно при подъеме на гору устанавливались неформальные контакты между участниками конференции, обсуждались доклады, выяснялись возникшие вопросы и решались деловые проблемы.

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины,
Киев



МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ «УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ 75»

Ю. К. БОНДАРЕНКО

Мировая общественность ведет отсчет начала ультразвуковой дефектоскопии (УЗД) — науки о методах и приборах контроля качества материалов и изделий — со 2 февраля 1928 г. Тогда молодой преподаватель кафедры специальной радиотехники Ленинградского электротехнического института (ЛЭТИ) Сергей Яковлевич Соколов направил заявку на способ и устройство для испытания материалов, на которую впоследствии был получен патент. В этой заявке было впервые предложено использовать УЗ для прозвучивания изделий с целью получения информации об их внутренних дефектах и структуре.

За 75 лет со дня открытия этот метод стал основным, а в ряде случаев — единственным возможным для выявления потенциально опасных дефектов в технических объектах промышленности, транспорта и строительства.

Широкое признание приоритета С. Я. Соколова как основоположника УЗД явилось основанием для созыва Форума специалистов, прошедшего в ПГУПС «ЛИИЖТ» под патронажем Правительства Санкт-Петербурга при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Активное участие ведущих фирм-производителей УЗ приборов в качестве спонсоров Форума позволило подготовить встречу без регистрационных взносов.

4–5 февраля 2003 г. в Санкт-Петербурге состоялась Международная конференция «Ультразвуковая дефектоскопия 75».

С обзором «С. Я. Соколов — основоположник методов УЗД» на открытии конференции выступил канд. техн. наук, С. К. Паврос (СПБГЭТУ).

С глубоким анализом состояния и перспектив развития проблем дефектоскопии изделий и конструкций выступил ведущий ученый д-р техн. наук, проф. А. К. Гурвич «Основные параметры УЗ контроля: теоретические предпосылки, метрологическое обеспечение и стандартизация (НИИ мостов МПС, г. С.-Петербург).

Важному вопросу состояния и перспектив развития дефектоскопии посвятил свой доклад ведущий ученый д-р техн. наук, проф. И. Н. Ермолов «Традиционные методы определения формы и размеров дефектов при УЗК металлоконструкций» (НПЦ «ЭХО+», г. Москва).

Проблеме «Эволюция методов определения форм и размеров дефектов при УЗК металлоконструкций» был посвящен доклад д-ра техн. наук, проф. А. Х. Вопилкина (НПЦ «ЭХО+», г. Москва). Заведующий кафедрой МГТУ им. Н. Э. Баумана чл.-кор. РАН Н. П. Алешин доложил о средствах и методах для определения ресурса конструкций «Новая информационная система диагностики технических объектов на базе УЗ методов».

Проблемам обеспечения качества сварных конструкций посвящен доклад канд. техн. наук Ю. К. Бондаренко «УЗ контроль качества как инструмент совершенствования технологий» (ИЭС Е. О. Патона НАН Украины, г. Киев).

Перспективные проблемы дефектоскопии были изложены в докладах А. А. Самокрутова «Развитие методов и средств УЗ неразрушающего контроля на базе фазированных антенных решеток» (ЗАО «Акустические контрольные системы», г. Москва); кандидатов техн. наук С. П. Горной «Новое представление распространения упругих волн в крупнозернистых анизотропных средах» (МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва); Н. П. Разыграева «Головные волны: теоретические основы, опыт и перспективы применения» (ЦНИИТМаш, г. Москва); д-ра техн. наук, проф. академика РАН Э. С. Горкунова «Использование акустического эффекта Баркгаузена для оценки кристаллографической анизотропии и уровня микронапряжений в ферромагнитных материалах» (ИМУрОРАН, г. Екатеринбург); канд. техн. наук А. А. Маркова «Эффект Доплера в УЗД: теоретическое обоснование и нереализованные возможности» («Радиоавионика», г. С.-Петербург); Ж. К. Никофоренко «Метод ЭМА-контроля литых аустенитных труб» (IZFH, г. Саарбрюкен) и других выступлениях.

Доклады, прочитанные на форуме не только отразили современные достижения, но и предопределяют дальнейшие пути развития теории, методов и средств акустического НК. Активное участие ведущих специалистов по НК и ТД в работе форума способствовало повышению научно-технического уровня и эффективности систем контроля на базе УЗ методов.

За прошедшие 75 лет УЗД стала УЗ дефектометрией, средством определения прочностных характеристик материала изделий и оценки его остаточного ресурса. Мечта С. Я. Соколова о звуковидении реализована средствами УЗ голограммы и томографии. Значительный вклад в развитие этого метода в разные годы внесли ученые и специалисты ведущих организаций страны: ЛЭТИ, ЦНИИТМАШ, ВИАМ, ПГУПС «ЛИИЖТ» и НИИ Мостов ЛИИЖТ (ИЭС им. Е. О. Патона) МГТУ, МНПО «СПЕКТР», НИИХимМаш, ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, ВНИИНК и многих других, а также фирм зарубежных стран: «Кратукрамер», IZFP, «Карл Дойч», «Панаметрикс», «Спери» и многие др. Весомый вклад в разработку УЗ приборов и диагностических систем вносят также фирмы, организованные за последние десять лет. На форуме были представлены результаты самых последних достижений в области акустических методов контроля качества промышленной продукции.

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины,
Киев



**Университет Св.Стефана (Венгрия)
ТЮФ Рейнланд Венгрия
Технический комитет Украины по технической диагностике
и неразрушающему контролю
АО Видеотон (Венгрия)**
проводят Международную Школу-Семинар

**АЭ ТЕХНОЛОГИИ В ОЦЕНКЕ СОСТОЯНИЯ
КОНСТРУКЦИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ.
ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ
ПО РЕАЛЬНОМУ (ФАКТИЧЕСКОМУ) СОСТОЯНИЮ**

28 сентября — 5 октября 2003

Венгрия, Будапешт

Цель Школы-Семинара — обсуждение технологий контроля, позволяющих прерывать эксплуатацию конструкций и оборудования только в случае возникновения ситуаций, развитие которых может привести к аварии.

Анализ современной экологической обстановки требует корректировки подходов к оценкам состояния эксплуатирующихся конструкций и сооружений с тем, чтобы можно было своевременно принимать меры по остановке аварийно опасных конструкций. Остро стоит вопрос о создании техники и технологий, определяющих не только наличие дефектов в конструкциях, но и возможность оценки их дальнейшей эксплуатации с этими дефектами. Следует также отметить, что традиционные методы расчетного анализа разрушения мало приемлемы в целях диагностики из-за значительных ошибок расчетов, достигающих 750 % выше. В этих условиях необходима альтернатива — методики существенного снижения ошибок расчетов или переход на другие методы анализа состояния конструкций. Работы в этом направлении проводятся многими специалистами с различным практическим выходом.

Вы получите возможность ознакомиться с последними достижениями и перспективами в области разработок, совершенствования и применения ВСМ-Технологий, аппаратурных и системных АЭ-Технологий, средств акустико-эмиссионной диагностики и мониторинга по обеспечению безопасной эксплуатации сварных конструкций, оборудования и сооружений с учетом получаемой оценки их реального (фактического) технического состояния.

Вы также сможете поделиться накопленным опытом в этой области и заключить соглашение о сотрудничестве.

На заседаниях предстоящей Школы-Семинара планируется заслушать доклады и сообщения по следующим направлениям:

1. Технологии выполнения контрольно-диагностических работ без разрушения конструкций с обеспечением 100 %-ного контроля их материалов.
2. Исследования и разработки по созданию технологий диагностирования, обеспечивающих возможность эксплуатации объектов по их фактическому состоянию.
3. Исследования и разработки по созданию мониторинговых диагностических систем.
4. Создание встроенных систем анализа состояния конструкций.
5. Автоматизация процессов диагностического контроля и принятия решения.
6. Разработка методов и средств диагностирования объектов без остановки технологических производственных процессов.
7. Подготовка и аттестация специалистов в области технической диагностики.
8. Аккредитация и сертификация диагностических служб и лабораторий.
9. Разработка и гармонизация стандартов, нормативно-технических документов в области технической диагностики.
10. Перспективные исследования в области совершенствования средств диагностирования и разработки смежных родственных технологий.

Будем рады приветствовать Вас в Венгрии в сентябре-октябре 2003 года.

Адрес Оргкомитета:

03150, г.Киев-150, а/я № 99.

Сопредседателю Оргкомитета «АЭ Технологии и Ресурс» А. Я. Недосеке.
Тел. (044) 227-66-46, (044) 220-06-60. Факс: (044) 261-56-24, (044) 261-55-88.
E-mail: ned@indprom.kiev.ua