

# ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

## № 3, 2009

Издается с января 1989 г.

**Учредители:** Национальная академия наук Украины

**Издатель:** Международная ассоциация «Сварка»

Институт электросварки им. Е. О. Патона

Международная ассоциация «Сварка»

### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор

**Б. Е. ПАТОН**

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

#### Адрес редакции

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

#### Научные редакторы

Н. Г. Белый, А. А. Грузд

#### Электронная верстка

Л. Н. Герасименко,  
И. Р. Наумова, Т. В. Юштина

#### 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

### СОДЕРЖАНИЕ

ИНСТИТУТУ ЭЛЕКТРОСВАРКИ ИМ. Е. О. ПАТОНА  
НАН УКРАИНЫ — 75 ЛЕТ ..... 3

### ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА

*ЛОБАНОВ Л. М., ПИВТОРАК В. А., КРОТЕНКО П. Д.* Методика определения глубины залегания дефектов в плоских элементах конструкций на основе электронной широгрaфии ..... 5  
*НЕДОСЕКА А. Я., НЕДОСЕКА С. А.* Акустическая эмиссия и квантовый характер разрушения материалов ..... 11  
*МАХНЕНКО В. И., МИЛЕНИН А. С., ОЛЕЙНИК О. И.* Методика ранжирования коррозионных дефектов магистральных газопроводов, обнаруженных при внутритрубной диагностике ..... 18  
*ЧАУСОВ Н. Г., БЕРЕЗИН В. Б., БОНДАР М. Н.* Особенности деформирования материалов в упругой области при динамических неравновесных процессах ..... 24

### НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

*ТРОИЦКИЙ В. А.* Новые решения в неразрушающем контроле сварных соединений ..... 27  
*КАРПАШ О. М., КАРПАШ М. О., РИБИЦКИЙ І. В., ТАЦАКОВИЧ Н. Л.* Розвиток засобів неруйнівного контролю і технічної діагностики в нафтогазовій галузі ..... 35  
*ТРОИЦКИЙ В. А., БЕЛЫЙ Н. Г., БУХЕНСКИЙ В. Н., ЛЕЩИШИН А. В., МИХАЙЛОВ С. Р., СЛОБОДЯН Н. В.* Высокочувствительные рентгенотелевизионные системы на основе рентгеновских экранов и ПЗС-камер с накоплением изображений ..... 41  
*ЗОЛОТАРЕВ С. Л., ВЕНГРИНОВИЧ В. Л.* Промышленная томография из низкоэнергетических рентгеновских проекционных данных ..... 47  
*МАЄВСЬКИЙ С. М.* Вимірювання фазової швидкості ультразвуку як спосіб визначення напружень та утоми конструкційних матеріалів ..... 51  
*ЮРЧЕНКО А. В., ШЕВЧЕНКО И. Я., СУББОТА А. В., ФИЛИПОВ А. Н., СЕРЕДА Р. С.* Опыт эксплуатации САУЗК труб среднего и большого диаметров на производственных площадях ОАО «ХТЗ» ..... 56

### НАУКА И ПРОИЗВОДСТВО

*БЕЗЛЮДЬКО Г. Я.* Коэрцитиметрия делает диагностику достовернее и дешевле ..... 59

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

№ 3, 2009

Founded in January, 1989

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

**Publisher:** International Association «Welding»

## EDITORIAL BOARD:

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

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

### Address:

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

### Scientific editors:

N. G. Bely, A. A. Gruzd

### Electron galley:

I. R. Naumova,  
L. N. Gerasimenko, T. V. Ushtina

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

E. O. PATON ELECTRIC WELDING INSTITUTE of the NAS  
of UKRAINE is 75 ..... 3

### TECHNICAL DIAGNOSTICS

*LOBANOV L. M., PIVTORAK V. A., KROTENKO P. D.* Procedure  
of determination of the depth of defect location in plane structural elements  
based on electron shearography ..... 5  
*NEDOSEKA A. Ya., NENDOSEKA S. A.* Acoustic emission and quantum  
nature of material fracture ..... 11  
*MAKHNENKO V. I., MILENIN A. S., OLEINIK O. I.* Procedure  
of ranging corrosion defects of the main gas pipelines found  
at in-pipe diagnostics ..... 18  
*CHAUSOV N. G., BEREZIN V. B., BONDAR M. N.* Features of material  
deformation in the elastic region at dynamic non-equilibrium processes ..... 24  
*TROITSKII V. A.* New solutions in non-destructive testing  
of welded joints ..... 27

### NON-DESTRUCTIVE TESTING

*KARPASH O. M., KARPASH M. O., RYBITSKII I. V., TATSAKOVICH N. L.*  
Development of the means of non-destructive testing and technical  
diagnostics in oil and gas industry ..... 35  
*TROITSKII V. A., BELY N. G., BUKHENSII V. N., LESHCHININ A. V.,  
MIKHAILOV S. R., SLOBODYAN N. V.* High-sensitivity X-ray TV systems  
based on X-ray screens and CCD cameras with image accumulation ..... 41  
*ZOLOTAREV S. L., VENGRINOVICH V. L.* Industrial tomography from  
low-energy X-ray projection data ..... 47  
*MAEVSKII S. M.* Measurement of ultrasound phase velocity as  
a method to determine stresses and fatigue of structural materials ..... 51  
*YURCHENKO A. V., SHEVCHENKO I. YA., SUBBOTA A. V., FILIPPOV  
A. N., SEREDA R. S.* Experience of service of AUIS for pipes of medium and  
large diameter at production facilities of OJSC «KhTZ» ..... 56

### SCIENCE AND PRODUCTION

*BEZLYUDKO G. Ya.* Coercimetry makes diagnostics more valid  
and less expensive ..... 59

#### JOURNAL PUBLICATION IS SUPPORTED BY:

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



Ukrainian Society for Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics

---

## ИНСТИТУТУ ЭЛЕКТРОСВАРКИ им. Е. О. ПАТОНА НАН УКРАИНЫ — 75 ЛЕТ

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

Сегодня институт представляет собой научно-технический комплекс, куда входят опытное конструкторско-технологическое бюро, экспериментальное производство, три опытных завода, ряд инженерных центров. Во всех его подразделениях работает около 3500 человек, из них в институте 1700 человек. Научный потенциал института составляют 300 научных сотрудников, среди которых 8 академиков и 6 членов-корреспондентов НАН Украины, 72 доктора наук и более 200 кандидатов наук.

Деятельность института и хозрасчетных подразделений строго координирована и полностью ориентирована на совместное решение задач по основным научным направлениям — прогрессивные технологии сварки и соединения материалов; прочность, надежность и долговечность сварных конструкций; технологии наплавки, нанесения покрытий и обработки поверхностей; процессы специальной электрометаллургии; новые конструкционные и функциональные материалы; техническая диагностика и неразрушающий контроль; автоматизация процессов сварки и родственных технологий.

Активное и непосредственное участие ученых института в практической реализации своих разработок обогащает их как работников академической науки в проведении фундаментальных исследований и поисковых разработок в области сварки, основ создания прочных и надежных сварных конструкций, создания оборудования и технологий, обеспечивающих их безопасную эксплуатацию в течение всего срока службы, а также специальной электрометаллургии, имеющих межотраслевое значение.

За прошедшие 75 лет институт доказал жизнеспособность ориентации на целенаправленные фундаментальные исследования, которые повышают значимость их результатов в последующих разработках. В активе ученых института уникальные результаты познания физики дугового разряда и низкотемпературной плазмы, свойств мощных остросфокусированных пучков электронов, природы плавления, испарения, кристаллизации и конденсации металлов, физико-химичес-

ких и теплофизических процессов сварки и рафинирующих переплавов, прочности и надежности сварных соединений и конструкций.

Результаты этих работ подтверждены лицензиями и полученными патентами. Институтом реализовано более 150 лицензий в США, Германию, Японию, Россию, Швецию, Францию, Китай и др. Получено около 2600 патентов Украины, России и дальнего зарубежья, а также 6500 авторских свидетельств.

За годы деятельности института более 60 наиболее выдающихся разработок, выполненных и внедренных в народное хозяйство сотрудниками института в содружестве с производственными коллективами, удостоены Ленинской премии, Государственных премий СССР, а также премий Украины.

Институт поддерживает широкие международные связи с ведущими центрами по сварке в Европе, США, Азии, является членом Международного института сварки и европейской сварочной федерации. На базе института действует Межгосударственный научный совет по сварке и родственным технологиям стран СНГ, Международная ассоциация «Сварка» и Международное объединение «Интерм», Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики, которое входит в состав Европейской федерации EFNDT и Всемирного конгресса ICNDT. При институте также работает технический комитет Госпотребстандарта Украины по технической диагностике и неразрушающему контролю, поддерживающий тесные связи с международными организациями ISO/TC 135/SC и CEN/TC 138.

Результаты исследований ученых института постоянно публикуются в журналах «Автоматическая сварка», «Техническая диагностика и неразрушающий контроль», «Современная электрометаллургия», «Сварщик». Кроме того, институт издает журналы на английском языке «The Paton Welding Journal» и «Advances in Electrometallurgy». Большое внимание уделяется публикации монографий, справочников и другой книжной продукции.

Институт проводит различные конференции и семинары, организывает национальные и международные выставки.

Следует отметить экспериментально-теоретические исследования и научные разработки в области прочности сварных соединений и конструкций, представляющих традиционные направления в тематике института, начало которым было положено Е. О. Патонем. Сегодня эти исследования носят многоплановый характер, для их проведения используется современное

испытательное оборудование в сочетании с проведением уникальных натурных экспериментов и компьютерного моделирования. Это позволяет разрабатывать новые эффективные методы повышения надежности ответственных инженерных сооружений при статическом и циклическом нагружении, а также устанавливать расчетно-конструктивные принципы обеспечения заданных служебных свойств сварных соединений. Во все более возрастающем объеме ведутся работы в области технической диагностики и неразрушающего контроля, работы по повышению надежности, долговечности и ресурса сварных конструкций, созданию эффективных методов их контроля. Наряду с неразрушающим контролем техническая диагностика начинает все более широко использоваться для обеспечения безопасной эксплуатации конструкций. В связи с эффективностью диагностических методов их развитие происходит быстрыми темпами, с внедрением высоких технологий контроля на базе наиболее передовой цифровой измерительной и вычислительной техники, современного программного обеспечения.

Наиболее эффективное применение в управлении процессом производства в предаварийной и аварийной ситуациях находят технологии, использующие явление акустической эмиссии, что позволяет своевременно принимать меры по предупреждению аварий, обеспечивая эксплуатацию конструкций по фактическому состоянию. К работникам диагностических комплексов все чаще выдвигается требование непрерывного мониторинга конструкций. Работа института в данном направлении ведется еще с начала 1970-х годов. Уже в 1974 г. коллективом авторов во главе с Б. Е. Патоном в журнале «Автоматическая сварка» была опубликована статья «Некоторые пути построения автоматических информационно-измерительных систем для диагностики надежности сварных конструкций», в которой заложены основные концепции дистанционного управления процессом диагностики на базе телекоммуникационных средств связи.

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

Внедрение средств диагностики в производство и подготовка соответствующих кадров требуют совершенствования нормативной базы. За последние годы институтом в тесном сотрудничестве с Госспоживстандартом Украины и Госгорпромнадзором Украины создан ряд отраслевых и государственных стандартов,

регламентирующих процедуру технической диагностики, оснащение диагностических лабораторий и вопросы обучения и сертификации специалистов.

В сложившейся ситуации возрастает роль подготовки специалистов, умеющих применять сложную диагностическую аппаратуру и системы. Эти вопросы успешно решают созданные совместно с Госгорпромнадзором Украины специализированные курсы по подготовке специалистов в данной области, на которых начиная с 1994 г. подготовлено более 2000 специалистов.

Одним из основных направлений деятельности института является подготовка и повышение квалификации научных и инженерных кадров. Подготовка кандидатов и докторов технических наук осуществляется через докторантуру и аспирантуру. При институте работает специализированный совет по приему к защите докторских и кандидатских диссертаций в области сварки, специальной электрометаллургии и автоматического управления технологическими процессами, диагностика материалов и конструкций.

Подготовка инженеров-физиков и математиков со специализацией в области сварки и специальной электрометаллургии осуществляется на кафедре физической металлургии и материаловедения Киевского отделения МФТИ, организованной на базе ИЭС.

Профессионально-техническая подготовка и переподготовка специалистов сварочного производства осуществляется в учебном центре института. Система обучения в центре достаточно гибкая. Структура учебных программ предусматривает очную как групповую, так и индивидуальную подготовку слушателей курсов. Обучение проводится по национальным и европейским стандартам с выдачей соответствующего сертификата.

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

За прошедшие 75 лет коллектив института прошел славный путь. Сегодня — это коллектив единомышленников, приумножающий успехи Патоновской научной школы, имеющей мировое признание. Институт растет и развивается, совершенствуется его структура и система управления — все направлено на дальнейшее развитие сварки, родственных процессов и технологий, связанных с надежной и безопасной эксплуатацией сварных конструкций, а также решение базовых проблем экономики промышленного производства.



## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛУБИНЫ ЗАЛЕГАНИЯ ДЕФЕКТОВ В ПЛОСКИХ ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОННОЙ ШИРОГРАФИИ

Л. М. ЛОБАНОВ, В. А. ПИВТОРАК, П. Д. КРОТЕНКО

*Разработана методика определения глубины залегания дефектов с использованием электронной ширографии, которая предоставляет новые возможности для выявления геометрических параметров зон коррозионных повреждений на внутренних поверхностях изделий и коррозионного подповерхностного расслоения.*

*A procedure was developed for determination of the depth of defect location using electron shearography, which opens up new possibilities for detection of geometrical parameters of corrosion damage zones on the product inner surfaces and subsurface corrosion delamination.*

Развитие современных отраслей промышленности ставит все новые задачи, направленные на повышение работоспособности и надежности конструкций. Для их решения необходимы новые методы неразрушающего контроля (НК), позволяющие получать оперативную, более точную информацию об объекте контроля. К ним относятся методы лазерной интерферометрии — оптическая голография, электронная спекл-интерферометрия и ширография.

В последние годы электронная ширография является наиболее интенсивно развивающимся когерентным оптическим методом исследования конструкций, который осуществляется с помощью простых оптических устройств и позволяет бесконтактно исследовать поверхность объекта, не повреждая ее. Нечувствительность электронной ширографии к жестким смещениям объекта, которые вызваны влиянием внешних воздействий, определяет его универсальность и эффективность применения в производственных условиях.

Суть метода электронной ширографии состоит в следующем. Контролируемый объект частично или полностью освещается с помощью лазера когерентной световой волной, которая при отражении от его поверхности попадает на сдвиговый элемент, размещенный перед объективом CCD-камеры. В плоскости изображения CCD-камеры появляются два смещенных изображения контролируемого объекта. Интерференция световых волн образует хаотичную микроинтерференционную спекл-картину, которая с помощью CCD-камеры вводится в компьютер. Полученные микроинтерференционные спекл-картины, записанные для двух состояний объекта (до и после нагружения), сравниваются и обрабатываются с целью получения макроинтерференционных полос (широграммы), которые несут информацию о произ-

водной от нормальной компоненты вектора перемещения точек поверхности [4]. Концентрация деформаций в зоне дефектов под действием нагрузки проявляется в виде локальной особенности на картине интерференционных полос [1–3, 5].

При выполнении НК качества элементов конструкций используется компактная ширографическая установка, в комплект которой входит одномодовый лазер для освещения поверхности исследуемого объекта, ширографический интерферометр, формирующий два сдвинутых относительно друг друга изображения, CCD-камера для передачи и записи изображений в компьютер с целью дальнейшей обработки интерференционных полос [5].

Представленные ниже исследования посвящены разработке методики, которая позволит определять глубину залегания дефектов в виде утонений круговой и квадратной формы. Схема нагружения одного из таких дефектов представлена на рис. 1, а. Область утонения рассматривается как круглая или квадратная пластина, которая жестко закреплена по контуру и нагружена равномерно распределенным по поверхности давлением  $p$  (рис. 1, б).

Для исследования методом электронной ширографии деформированного состояния пластины, содержащей утонения, используется оптическая схема с близким к нормальному направлению освещения и наблюдения. Такая схема дает возможность в зависимости от направления широдвига получать частную производную  $\frac{\partial w}{\partial x}$  от нормальных перемещений поверхности по переменной  $x$ , или же производную  $\frac{\partial w}{\partial y}$  по переменной  $y$ . В случае широдвига  $\delta y$  вдоль оси  $OY$ , на основании измерения относительного изменения



фазы  $\varphi$ , определяется производная, умноженная на широдвиг

$$\frac{\partial w}{\partial y} \delta y = \frac{\lambda \varphi}{4\pi}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  — длина волны света, которая генерируется лазером;  $\delta y$  — величина широдвига.

Рассмотрим утонение, имеющее круговую форму, для выявления которого использовали нагружение давлением с применением вакуумной камеры. Нормальные перемещения, возникающие при деформировании области утонения, вычисляли путем использования соотношений теории пластин. Выражение для перемещений имеет следующий вид [6]:

$$w = w_0 \left( 1 - \frac{r^2}{r_0^2} \right)^2, \quad (2)$$

где  $w_0 = \frac{pr_0^4}{64D}$  — максимальный прогиб пластины в центре;  $p$  — приложенное давление;  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$  — текущий радиус;  $r_0$  — радиус области утонения;  $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$ ;  $E$  — модуль упругости;  $h$  — глубина залегания дефекта;  $\nu$  — коэффициент Пуассона.

Чтобы получить соотношение для определения глубины залегания дефекта, найдем вторую производную  $\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$ :

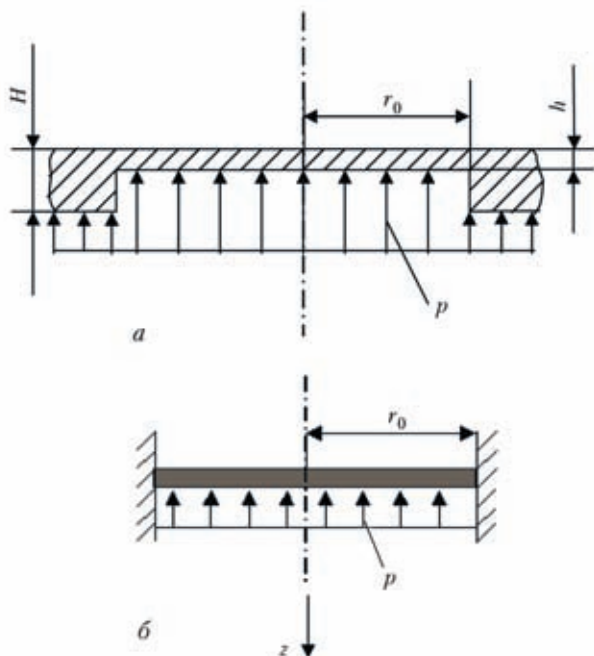


Рис. 1. Схема нагружения: а — области с заложенным дефектом; б — «эквивалентной» пластины, которая моделирует дефектную область

$$\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = \frac{8w_0 y^2}{r_0^4} - \frac{4w_0(1 - \frac{x^2 + y^2}{r_0^2})}{r_0^2}. \quad (3)$$

При  $x = y = 0$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = -\frac{4w_0}{r_0^2} = -\frac{3(1-\nu^2)pr_0^2}{4Eh^3}. \quad (4)$$

Из уравнения (4) можно определить глубину залегания дефекта  $h$  (рис. 1, а). Для этого достаточно знать величину второй производной  $\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$  в точке  $x = y = 0$ , радиус утонения  $r_0$ , величину приложенного давления  $p$ , механические характеристики материала.

Для разработки методики определения значения второй производной  $\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$  в точке  $x = y = 0$  на основе расчетных данных о распределении производной  $\frac{\partial w}{\partial y}$  вдоль выбранного направления сканирования, рассмотрим выражение для производной  $\frac{\partial w}{\partial y}$  при  $x = 0$ :

$$\frac{\partial w}{\partial y} = -\frac{4w_0 y}{r_0^2} + 4w_0 \frac{y^3}{r_0^4}. \quad (5)$$

В представлении (5) легко выделяется линейная часть  $f(y)$ . Тогда

$$f(y) = -\frac{4w_0}{r_0^2} y. \quad (6)$$

Графиком функции  $f(y)$  есть прямая линия с угловым коэффициентом

$$K^{(p)} = -\frac{4w_0}{r_0^2}. \quad (7)$$

Из уравнений (4) и (7) следует, что угловым коэффициентом линейной части производной  $\frac{\partial w}{\partial y}$

равняется значению второй производной  $\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$  в

точке  $x = y = 0$ . Для наглядности полученных результатов, используя расчетные данные, представим уравнения (5) и (6) в графическом виде (рис. 2). Для расчета приняты следующие начальные данные:  $r_0 = 23$  мм,  $h = 1,1$  мм, модуль упругости и коэффициент Пуассона соответственно  $E = 71000$  МПа и  $\nu = 0,3$ , величина приложенного давления  $p = -10$  Мбар. Из приведенных графиков видно, что линейный участок изменения производной

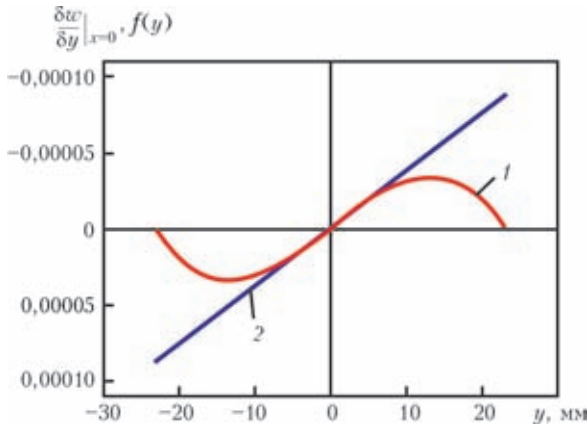


Рис. 2. Графическое представление изменения производной  $\partial w / \partial y$  (1) при  $x = 0, -23 \leq y \leq 23$ , а также ее линейной части (2) для жестко защемленной круглой пластины радиусом  $a = 23$  мм и толщиной  $h = 1,1$  мм при нагружении давлением

водной  $\frac{\partial w}{\partial y}$  (кривая 1), а также прямая 2, которая представляется уравнением (6), в окрестности начала координат совпадают. Полученные результаты позволяют сформулировать алгоритм определения второй производной от прогиба  $\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$  в точке  $x = y = 0$ , основываясь на расчетном представлении распределения первой производной  $\frac{\partial w}{\partial y}$  вдоль выбранного направления сканирования (кривая 1 на рис. 2). Приближим линейный участок кривой распределения производной  $\frac{\partial w}{\partial y}$  (рис. 2) в окрестности начала координат прямой. Для этого на линейном участке выберем шесть реперных точек с шагом 2 мм. Используя их координаты, применяя стандартную процедуру метода наименьших квадратов, приблизим полиномом первого порядка участок, который рассматривается. Полученное уравнение прямой 2 (рис. 2) как функция координаты  $y$  запишется в виде

$$f_1(y) = -3,8 \cdot 10^{-6} y. \quad (8)$$

Уравнение (8) позволяет определить угловой коэффициент, т. е. получить приближенное значение второй производной  $\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$  при  $x = y = 0$ . Вторая производная  $\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$ , подсчитанная по формуле (4), имеет значение  $-3,821 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^{-1}$ . Погрешность определения второй производной из уравнения (8) по отношению к значению второй производной, рассчитанной по формуле (4), составляет 0,6 %. При использовании распределения производной  $\partial w / \partial y$ , полученного на основе экспериментальных данных, значение второй произ-

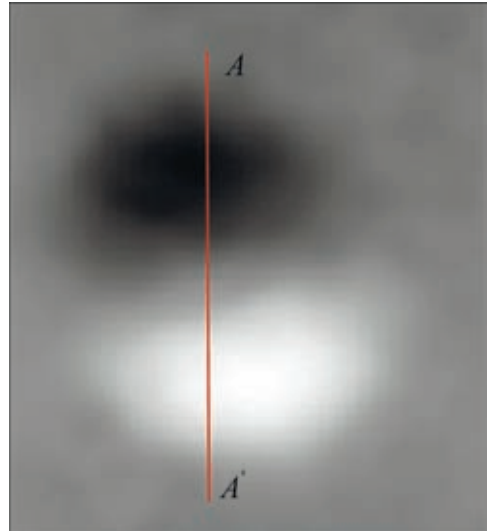


Рис. 3. Фазовая картина, характеризующая деформированное состояние утонения круговой формы диаметром 46 мм (AA — линия сканирования)

водной будет находиться с определенной погрешностью, которая превосходит приведенную выше. Представленная методика дает возможность, используя кривую распределения производной от прогиба в реперных точках на линейном участке, определять соответствующий угловой коэффициент. Радиус круговой области утонения, как будет показано ниже, определяется на основании экспериментальных данных.

Рассмотрим применение полученных результатов для экспериментального определения глубины залегания дефектов. С этой целью для проведения экспериментов был изготовлен тестовый образец из сплава АМг6 размерами  $650 \times 500 \times 14$  мм с заложенными дефектами в виде утонений круговой и квадратной формы. Утонения имели равную толщину, которая составляла  $h = 1,1$  мм (рис. 1, а). Для дефекта круговой формы диаметром 46 мм фазовая картина, полученная с применением метода электронной широгографии, в результате приложения давления  $\Delta p = -10$  Мбар, имеет вид, приведенный на рис. 3. Экспериментальная кривая распределения производной, умноженной на широдвиг  $\frac{\partial w}{\partial y} \delta y$ , представлена на рис. 4, а, где  $BB_1$  — часть кривой, которая используется при линейной аппроксимации.

Для определения  $\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} |_{x=y=0}$  на основании экспериментальных данных, получим соотношение

$$K^{(\text{экс})} = K^{(p)} \delta y = \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} |_{x=y=0} \delta y, \quad (9)$$

тогда





$$\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \Big|_{x=y=0} = \frac{K^{(экс)}}{\delta y}, \quad (10)$$

где  $K^{(экс)}$  — угловой коэффициент, который характеризует наклон линейного участка кривой распределения производной  $\frac{\partial w}{\partial y} \delta y$  вдоль линии сканирования фазовой картины;  $\delta y$  — значение величины широдвига, который измеряется перед проведением эксперимента ( $\delta y = 8$  мм). На основании соотношений (4) и (10) получим выражение для вычисления глубины залегания дефекта:

$$h = \frac{\sqrt[3]{-3(1-v^2)\delta y p r_0^2}}{4E|K^{(экс)}}. \quad (11)$$

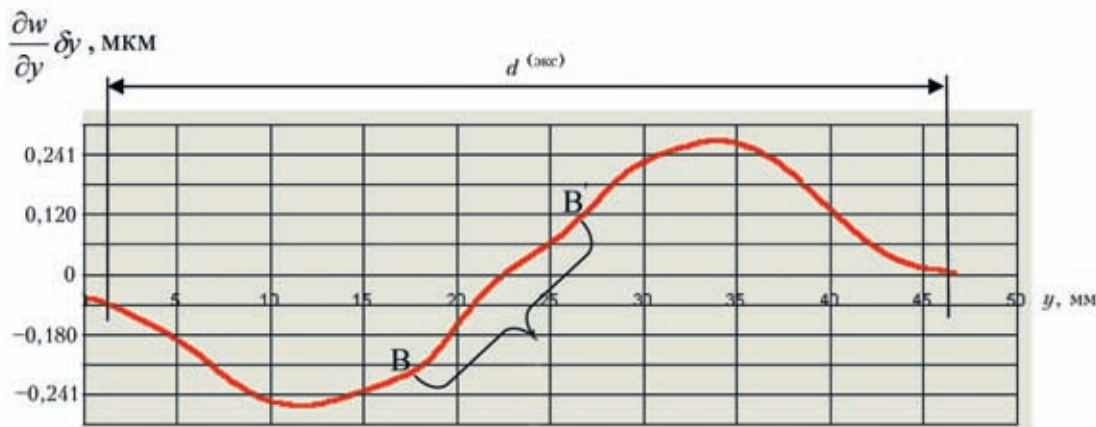
$K^{(экс)}$  — коэффициент, который определяется, исходя из приближения прямой линейного участка  $BB'$  графика распределения производной, умно-

женной на широдвиг  $\frac{\partial w}{\partial y} \delta y$ , вдоль линии сканирования фазовой картины (рис. 4, а). Начало координат выбирается в точке пересечения линейного участка с осью абсцисс. В качестве реперных рассматриваются точки, которые принадлежат экспериментально полученному линейному участку  $BB'$  кривой распределения производной  $\frac{\partial w}{\partial y} \delta y$  (рис. 4, б). Приближая линейный участок полиномом первой степени, получаем

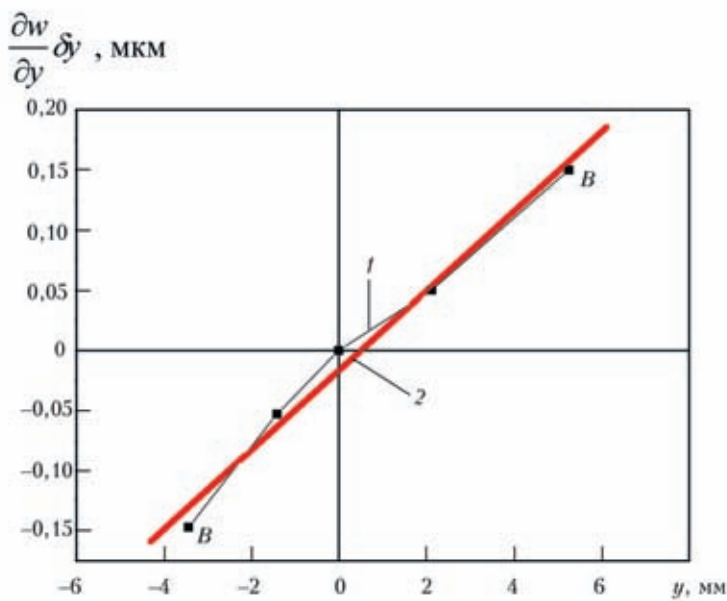
$$\frac{\partial w}{\partial y} \delta y = -0,03304y + A, \quad (12)$$

где  $A = -0,01669$  мм.

Уравнение (12) представляет в функциональном виде линию с угловым коэффициентом  $K^{(экс)} = -0,03304$ . Наличие слагаемого, равного  $-0,01669$  мм, свидетельствует о том, что линия, опи-



а



б

Рис. 4. Графическое представление изменения величины  $(\partial w/\partial y)\delta y$ : а — с выделенным линейным участком  $BB'$ , которое получено в результате сканирования фазовой картины вдоль линии  $AA'$  (рис. 3); б — 1 — первоначальное приближение ломаной участка  $BB'$ ; 2 — линейная аппроксимация выделенного участка графика  $BB'$





сываемая уравнением (12), не проходит через начало координат. Функцией является производная  $\frac{\partial w}{\partial y}$ , которая умножена на величину широдвига. На основании графика, представленного на рис. 4,  $a$ , по длине характерного участка  $d^{(экс)}$  можно определить диаметр области дефекта. Для радиуса области дефекта получаем величину  $r_0^{(экс)} = d^{(экс)}/2 = 23,940$  мм. Используя определенные выше параметры, после их подстановки в выражение (11), получим глубину залегания дефекта  $h^{(экс)} = 1,142$  мм. Относительная погрешность определения глубины залегания дефекта  $\varepsilon = 3,9\%$ .

При исследовании тестового образца, в котором заложены утонения, имеющие квадратную форму, участок утонения рассматривается как квадратная пластинка, жестко защемленная по контуру. Прогиб, который возникает в результате нагружения жестко защемленной квадратной пластины равномерно распределенным давлением при  $x = 0$  и  $-\frac{b}{2} \leq y \leq \frac{b}{2}$  представляется выражением [6]:

$$w = \frac{pb^2}{32D} \left( \frac{b^2}{4} - y^2 \right) + w_1; \quad w_1 = -\frac{pb^3}{64D} \times \quad (13)$$

$$\times \left[ \sum_{n=1, 3, 5, \dots}^{\infty} \left\{ A_n \frac{4}{n^2 \pi^2 ch^2 \frac{n\pi}{2}} (F_n(y) + bsh \frac{n\pi}{2} \cos \frac{n\pi y}{b}) \right\} \right],$$

где  $F_n(y) = bsh \left( \frac{n\pi}{2} \right) ch \left( \frac{n\pi y}{b} \right) - 2ych \left( \frac{n\pi}{2} \right) sh \left( \frac{n\pi y}{b} \right)$ , постоянные  $A_n$  определяются из системы линейных алгебраических уравнений. Данная система в свою очередь образуется в результате удовлетворения граничных условий.

Выполнив дифференцирование прогиба (13) по переменной  $y$ , получим

$$\frac{\partial w}{\partial y} = -\frac{pb^2}{16D} y + \frac{\partial w_1}{\partial y}, \quad (14)$$

$$\frac{\partial w_1}{\partial y} = -\frac{pb^3}{64D} \left[ \sum_{n=1, 3, 5, \dots}^{\infty} \left\{ A_n \frac{4}{n^2 \pi^2 ch^2 \frac{n\pi}{2}} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \left( n\pi sh \frac{n\pi}{2} sh \frac{n\pi y}{b} - 2ch \frac{n\pi}{2} sh \frac{n\pi y}{b} - 2y \frac{n\pi}{b} \times ch \frac{n\pi}{2} ch \frac{n\pi y}{b} - \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. - n\pi sh \frac{n\pi}{2} \sin \frac{n\pi y}{b} \right) \right\} \right]. \quad (15)$$

Для построения методики, которая позволит определять глубину залегания дефекта квадратной формы, получим аналитическое представле-

ние линейной части производной  $\frac{\partial w}{\partial y}$ . Для этого

в выражении (15) разложим функции  $sh \frac{n\pi y}{b}$  и  $\sin \frac{n\pi y}{b}$  в степенные ряды и при этом ограничимся лишь первыми членами. В результате получим следующее выражение для линейной части  $L_1(y)$  производной  $\frac{\partial w_1}{\partial y}$ :

$$L_1(y) = \frac{pb^2 y}{4\pi D} \sum_{n=1, 3, 5, \dots}^{\infty} A_n \frac{1}{nch \frac{n\pi}{2}}. \quad (16)$$

На основании зависимостей (14) и (16) окончательное выражение для линейной части производной  $\frac{\partial w}{\partial y}$  имеет вид:

$$L(y) = \frac{pb^2 y}{4D} \left( \frac{1}{\pi} \sum_{n=1, 3, 5, \dots}^{\infty} A_n \frac{1}{nch \frac{n\pi}{2}} - \frac{1}{4} \right). \quad (17)$$

Выражение для второй производной  $\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$  при  $x = y = 0$ , получим после дифференцирования соотношений (14), (15):

$$\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = \frac{pb^2}{4D} \left( \frac{1}{\pi} \sum_{n=1, 3, 5, \dots}^{\infty} \frac{A_n}{nch \frac{n\pi}{2}} - \frac{1}{4} \right). \quad (18)$$

Анализ выражения (17) для линейной части производной  $\frac{\partial w}{\partial y}$  и выражения (18) для второй производной  $\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$  в точке  $x = y = 0$  показал, что угловой коэффициент уравнения прямой, при помощи которого описывается линейная часть производной  $\frac{\partial w}{\partial y}$ , равняется значению второй производной  $\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$  в точке  $x = y = 0$ . Таким образом, имея экспериментально полученную кривую распределения производной  $\frac{\partial w}{\partial y}$  в зависимости от координаты  $y$ , можно определить значение второй производной  $\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$  в точке  $x = y = 0$ . Для этого достаточно приблизить линейную часть кривой распределения производной  $\frac{\partial w}{\partial y}$  вдоль координаты



уравнением  $y$  первой степени (прямой линией). Угловой коэффициент в полученном уравнении будет приближенно равен второй производной от прогиба поверхности дефекта в точке  $x = y = 0$ .

Аналогично, как и для дефектов круговой формы, в случае дефектов квадратной формы будем иметь соотношение (10). В рассматриваемом случае  $\delta y = 8$  мм. Коэффициент  $K^{(экс)}$  определяется путем аппроксимации полиномом первой степени линейного участка кривой распределения величины производной  $\frac{\partial w}{\partial y}$ , умноженной на широдвиг.

Из соотношений (10) и (18) получим выражение для определения глубины залегания дефекта  $h$  в виде:

$$h = \sqrt[3]{\frac{3(1 - \nu^2)\delta y p b^{(экс)2}}{E|K^{(экс)}|} \left\{ \frac{1}{\pi} \sum_{n=1, 3, 5, \dots}^{\infty} \frac{A_n}{nch \frac{n\pi}{2}} - \frac{1}{4} \right\}}, \quad (19)$$

где  $b^{(экс)}$  — экспериментально определяемая длина дефекта.

При этом учитывается выражение для  $D = \frac{Eh^3}{12(1 - \nu^2)}$ .

Рассмотрим случай заложеного дефекта в виде утонения квадратной формы со стороной  $b^{(экс)} = 43$  мм. Используя описанную выше процедуру определения экспериментального значения углового коэффициента  $K^{(экс)}$ , было получено  $K^{(экс)} = -0,042$ . Величина приложенного давления  $p = -10$  Мбар.

Все параметры, которые входят в выражение (19), известны. После их подстановки получим:  $h^{(экс)} = 1,076$  мм. Относительная погрешность определения глубины залегания дефекта составляет  $\varepsilon = 2,2\%$ .

### Вывод

Разработанная методика определения глубины залегания дефектов с использованием электронной широгрaфии предоставляет новые возможности для выявления геометрических параметров зон коррозионных повреждений на внутренних поверхностях изделий и коррозионного подповерхностного расслоения.

1. *Trends in Optical Nondestructive Testing and Inspection* / Ed.: K. Promod. Rastogi and Daniele Inaudi, Elsevier, VK. — 2000. — 633 p.
2. *Состояние и перспективы применения метода электронной широгрaфии для диагностики элементов и узлов конструкций* / Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, Е. М. Олейник, И. Я. Киянец // Автомат. сварка. — 1998. — № 11. — С. 26–31.
3. *Методика, технология и аппаратура широгрaфического неразрушающего контроля материалов и элементов конструкций* / Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, Е. М. Олейник, И. В. Киянец // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2004. — № 3. — С. 25–28.
4. *Wolfgang Steinchen, Lianxiang Yang. Digital shearography: Theory and Application of Digital Speckle Pattern Shearing Interferometry.* SPIE Press, 2003. — 330 p.
5. *Диагностика элементов и узлов конструкций с применением метода электронной широгрaфии* / Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, Е. Н. Савицкая, И. В. Киянец // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2008. — № 4. — С. 7–13.
6. *Тимошенко С. П.* Курс теории упругости. — Киев: Наук. думка, 1972. — 497 с.

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

Поступила в редакцию 30.06.2009

**СИСТЕМА СЛЕЖЕНИЯ ЗА СТЫКОМ  
ПРИ СВАРКЕ ПРОДОЛЬНЫХ СТЫКОВ ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА**



Система предназначена для автоматического наведения сварочного инструмента на стык с точностью  $\pm 0.5$  мм при скорости сварки до 150 м/ч. Разработка внедрена в производство на предприятии ОАО «Харьцызский трубный завод» (Украина, 2007 г.).  
ИЭС им. Е.О.Патона, 03680, г. Киев, ул. Боженко, 11, Тел./факс: (044) 287-67-11, 271-25-05, E-mail: eshapovalov@paton.kiev.ua



## АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ И КВАНТОВЫЙ ХАРАКТЕР РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

А. Я. НЕДОСЕКА, С. А. НЕДОСЕКА

*Рассмотрен вопрос образования и распространения квантов волн акустической эмиссии, тесно связанных с дискретным характером развития разрушения и накопления повреждений (дефектов). Измерение и анализ волн деформаций позволяет судить о степени поврежденности материала и влиянии этого процесса на несущую способность конструкции.*

*The paper deals with formation and propagation of acoustic emission wave quanta closely related to the discrete nature of fracture development and accumulation of damage (defects). Measurement and analysis of deformation waves allows assessment of the degree of material damage and influence of this process on the structure load-carrying capacity.*

Разработки в области квантовой механики разрушения (КМР) появились в связи с необходимостью более тонкого, начиная с микроуровня, исследования процессов зарождения очагов разрушения и их развития во времени, когда перемещение и группирование дислокаций только начинают обозначать области материала, в которых будут формироваться и развиваться трещины и протекать разрушение [12].

Более точная теория также необходима для анализа волновых процессов, сопровождающих разрушение материалов. Волны деформаций несут информацию об этих процессах и дают возможность их анализировать и управлять ими. Для этих целей используются методы и аппаратура, позволяющие улавливать и расшифровывать волны деформаций материала. Поскольку процесс излучения волн деформаций принято называть акустической эмиссией, то аппаратура, регистрирующая и расшифровывающая эти волны, называется акустико-эмиссионной, а метод исследования физических процессов, протекающих в материалах и связанных с излучением волн деформаций — акустико-эмиссионным (АЭ).

Мы будем рассматривать лишь небольшую часть КМР с применением метода АЭ, которая может быть использована при оценке состояния материалов конструкций без их разрушения.

Физические исследования разрушения материалов показывают, что этот процесс протекает дискретно [1, 2, 5–7, 12, 15], когда каждая последующая порция (квант) деформации возникает в результате резкого изменения состояния материала вначале в микрообъеме, когда образуются и развиваются отдельные несплошности в виде пор, а затем во все более увеличивающемся объеме металла. Последующее накопление повреждений приводит к образованию и росту трещин и разрушению.

На рис. 1 показаны результаты испытания стального образца на растяжение с использованием группы датчиков АЭ. Из рисунка видно, что прирост деформации происходит дискретно практически на всем участке растяжения образца вплоть до окончательного разделения его на две части. Синим цветом выделены столбики всплесков АЭ взрывного характера. Эта часть АЭ представляет кванты разрушения, накапливающиеся в процессе деформирования образца в контролируемом кластере. Зеленым цветом в нижней части графика показана непрерывная эмиссия, связанная с развитием разрушения по всему объему контролируемой области. Ее минимальное значение составляет  $2 \cdot 10^{-7}$  см. Верхняя красная кривая показывает растягивающую нагрузку, действующую на образец в процессе испытаний.

На развитие образованного в процессе деформирования или уже существующего дефекта оказывают влияние многие факторы. Часть из них известна, но можно предположить, что есть и такие, о существовании которых мы пока не знаем. Сказанное существенно влияет на качество расчета критических состояний материалов конструкций. Для контролеров, занимающихся оценкой состояния материалов, задача может быть упрощена. Так, начало разрушения и сам процесс постепенной потери материалом несущей способности, как правило, начинается при неблагоприятном сочетании ряда отдельных факторов, влияющих на работоспособность конструкции в процессе ее эксплуатации. На рис. 2 представлена схема сигнализации материала о своем состоянии при неблагоприятном сочетании нескольких факторов, например, напряженного состояния, степени потери материалом служебных свойств в результате старения при эксплуатации, неблагоприятной рабочей температуры. Если сочетание указанных факторов достигнет критического значения, то появится область, содержащая недопустимое коли-

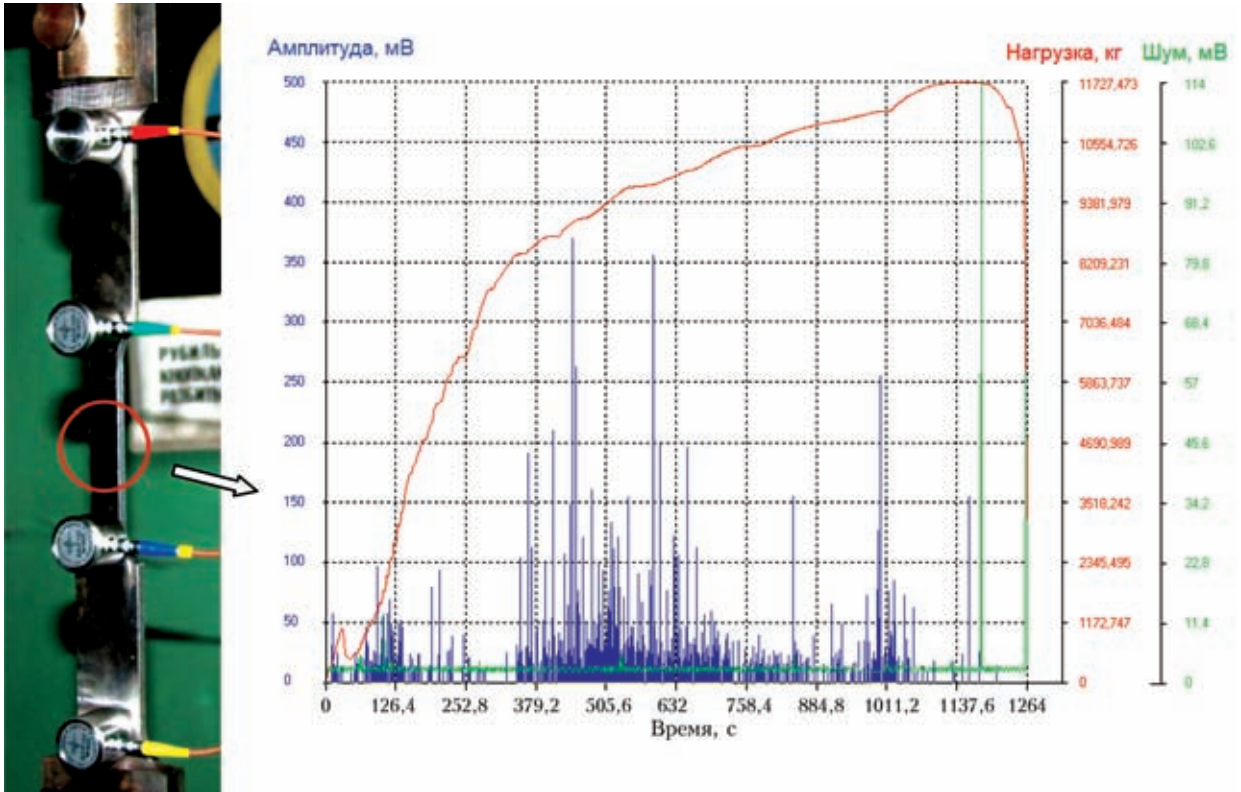


Рис. 1. Испытание образца из стали 17Г1С на растяжение с использованием датчиков АЭ



Рис. 2. Факторы, влияющие на возникновение и развитие разрушения, и квант АЭ как отклик материала на свое состояние

чество дефектов, которые начнут скачкообразно объединяться.

Дискретное, скачкообразное развитие дефектов приводит к появлению импульсов (квантов) АЭ, сигнализирующих о начале разрушения материала. Дальнейшее развитие процесса будет сопровождаться все более интенсивным выделением квантов АЭ, материал таким способом будет все время сигнализировать о своем состоянии. Рассмотрим возникновение квантов АЭ в достаточно толстой пластине, когда наличием отражения волн от ее нижней границы можно пренебречь. Теоретически такую среду можно представить в виде полупространства, показанного на рис. 3.

Задача о распространении упругих волн в пластинах от дискретного

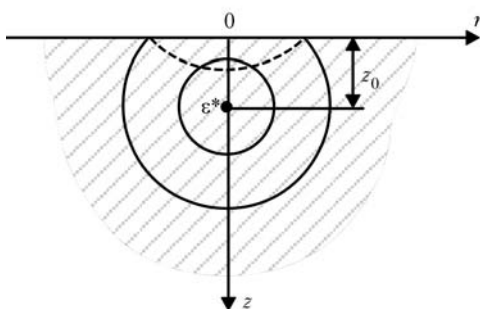


Рис. 3. Источник АЭ в полупространстве

точечного источника решалась многими специалистами. Недостатком решения была громоздкость математической модели и трудность получения результатов в замкнутом виде [16, 18, 20]. Кроме того, способы практической реализации принятых моделей не позволяли дать полный анализ спектра волн, возникающих от единичного источника. В приведенной ниже модели мы попытались избежать ограничения по количеству волн, участвующих в образовании суммарной волны при точечном источнике излучения за





счет применения преобразований Лапласа. Такое преобразование, как показал Деч Г. [3], позволяет учесть все элементарные волны, составляющие суммарную волну.

Прежде чем приступить к решению поставленной задачи целесообразно рассмотреть границы области, в которой АЭ аппаратура будет реагировать на процессы, протекающие в материалах при разрушении. Поскольку все процессы разрушения материалов связывают с возникновением и перемещением дислокаций, рассмотрим этот вопрос применительно к нашей задаче.

Двигающиеся вдоль плоскостей скольжения дислокации постепенно накапливаются у препятствия, например, на границе зерна [4, 8, 11, 13, 14, 19]. Показано, что, если количество сжатых дислокаций для металлов достигнет на границе 100 единиц и более, происходит образование микротрещины, длина которой растет от атомной ( $10^{-7}$  см) до окончательной за очень малый промежуток времени и составляет  $10^{-5}$  см. Выше было показано, что весь процесс разрушения протекает дискретно. Объем металла, в котором произошло скачкообразное образование микротрещины, можно приближенно подсчитать, исходя из предположения, что дислокации приходят в зону трещины с разных направлений и в этом не последнюю роль в зоне слияния играет изменяющееся по направлению поле главных напряжений.

Тогда, предположив, что образование микротрещины происходит в микрообъеме, ограниченном шаром радиуса  $a_1$ , можно положить  $V_0^* = 4/3\pi a_1^3$  и  $V_0^* = V_0^* t_1$  (рис. 4). Здесь  $t_1$  — время реализации процесса образования микротрещины, приближенно равно  $10^{-6}$  с для 100 дислокаций [4, 8]. Тогда, если  $V_0^* = 4/3\pi(0,5 \cdot 10^{-5})^3$  см<sup>3</sup>, то значение  $V_0^*$  для рассматриваемого случая получится  $V_0^* \approx 0,5 \cdot 10^{-21}$  см<sup>3</sup>·с. Это очень малые величины. АЭ, вызванная таким возмущением, мала, но может быть зафиксирована существующей измерительной техникой. Стабильная работа АЭ аппаратуры начнется тогда, когда размеры развивающейся трещины достигнут таких величин, а излучаемые сигналы такой мощности, при которых чувствительность аппаратуры будет достаточной для стабильного срабатывания АЭ датчиков.

Эксперименты, проведенные с использованием АЭ технологии на образцах из различных сталей, показали, что время релаксации накопленной в процессе растяжения деформации составляет примерно 0,05 с и более. Если принять за исходную для контроля область развивающегося дефекта примерно 0,09 см, что вполне достаточно с точки зрения прочности материала, и учесть, что используемая нами аппаратура АЭ

позволяет проводить измерения перемещений поверхности пластин, начиная с  $1 \cdot 10^{-7}$  см, то даже для толстых пластин можно надежно фиксировать координаты и энергетические параметры волн, связанных с возникновением и развитием дефектов, вплоть до разрушения материала. Заметим, что экспериментальные данные, полученные на образцах, и принятые допущения по размерам регистрируемого дефекта на четыре порядка превышают рассмотренные выше параметры для первичных микротрещин, образуемых сливающимися дислокациями ( $10^{-5}$  см).

Итак, пусть в сферическом объеме радиусом  $a_1$  полупространства на глубине  $z = z_0$  в результате быстрой локальной перестройки структуры материала внезапно возник и исчез точечный источник излучения. Представим его в виде

$$\varepsilon^* = \frac{V_0^*}{2\pi r} \delta(r) \delta(z - z_0) \delta_+(t). \quad (1)$$

Здесь положение величины  $\varepsilon^*$  в пространстве ограничено точкой на глубине  $z = z_0$  с помощью дельта-функций Дирака при  $t_0 = 0$  (рис. 5). Ограничение по времени функцией  $\delta_+(t)$  определяет условия действия источника, показывая, что в момент времени  $t = +0$  возник и исчез точечный источник деформации, представляющий собой импульс изменения объема материала  $V_0^*$  в точке с координатами  $(0, z_0, +0)$ .

Примем  $V_0^* = 4/3\pi a_1^3 t_1$ , где  $t_1$  — время перестройки структуры материала. Дифференциальные уравнения динамической задачи теории упругости для этого случая могут быть записаны так:

$$\nabla^2 \varphi - \frac{1}{C_1} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = \frac{1 + \nu}{1 - \nu} \varepsilon^*, \quad \nabla^2 \psi - \frac{1}{C_2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0. \quad (2)$$

Рассматриваемое полупространство вместе с воздействующим на него силовым полем, вызванным локальным изменением объема материала, может быть описано следующими граничными и начальными условиями:

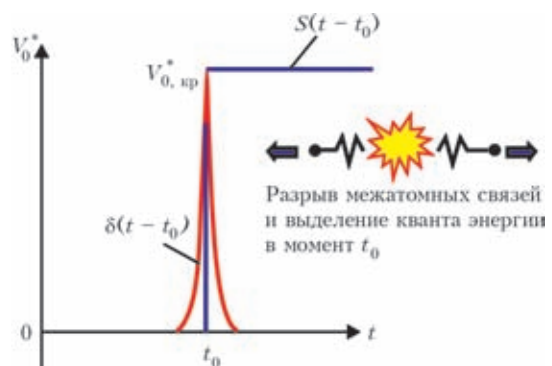


Рис. 4. Схема изменения микрообъема  $V_0^*$  в пластине с выделением кванта энергии



$\sigma_z = 0, \tau_{rz} = 0$  при  $z = 0$ ,  
 $\sigma_r = \sigma_\theta = \sigma_z = \tau_{rz} \rightarrow 0$  при  $r \rightarrow \infty, z \rightarrow \infty, t = 0, t \rightarrow \infty$ .

Тогда, применив к уравнениям (2) интегральные преобразования Лапласа по  $t$  и Ханкеля по  $r$ , с учетом (1) и приведенных граничных и начальных условий для  $\bar{w}$  при  $z < z_0$  получим [1]:

$$\bar{w} = -\frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{V_0^*}{4\pi} \times \left[ 1 + \frac{2\alpha\beta_1\beta_2 + (\alpha^2 + \beta_2^2)(\alpha^2 + p^2/(2C_2^2))}{\Delta} e^{-2\beta_1 z} - 4\alpha^2 \frac{\alpha^2 + p^2/(2C_2^2)}{\Delta} e^{-(\beta_1 + \beta_2)z} \right] e^{-\beta_1(z_0 - z)}, \quad (3)$$

где

$$\beta_1 = \sqrt{\alpha^2 + p^2/C_1^2}; \quad \beta_2 = \sqrt{\alpha^2 + p^2/C_2^2};$$

$$2\Delta = (\alpha^2 + \beta_2^2)^2 - 4\alpha^2\beta_1\beta_2.$$

Здесь  $\alpha, p$  — параметры преобразований Ханкеля и Лапласа;  $w$  — перемещение в направлении оси  $Oz$ .

При выполнении обратных преобразований будем рассматривать следующие два случая. Случай, когда дефект перестраивается и описывается функцией (1), при этом, применяя обратные преобразования Ханкеля и Лапласа к выражению (3), почленно получаем:

$$w_1 = -\frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{V_0^*}{4\pi} \frac{C_1(z_0 - z)}{(z_0 - z)^2 + r^2} \times \left[ \delta'_+ [C_1 t - \sqrt{(z_0 - z)^2 + r^2}] + \frac{\delta_+ [C_1 t - \sqrt{(z_0 - z)^2 + r^2}]}{\sqrt{(z_0 - z)^2 + r^2}} \right], \quad (4)$$

$$w_2 = m_2 \left[ \frac{\sin(3\varphi^*/2)}{r_1^{3/4}} - 3 \frac{r_0^2}{r_1^{5/4}} \sin\left(\frac{5}{2}\varphi^* - 2\varphi_0\right) \right], \quad (5)$$

$$w_3 = -m_3 \left[ \frac{\sin(3\varphi/2)}{r_1^{3/4}} - 3 \frac{r_{01}^2}{r_2^{5/4}} \sin\left(\frac{5}{2}\varphi_1 - 2\varphi_{01}\right) \right], \quad (6)$$

$$w = w_1 + w_2 + w_3, \quad (7)$$

$$m_2 = \frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{V_0^*}{\pi} \frac{C_2^2}{C_3} \frac{\gamma_1\gamma_2 + (1 - C_3^2/(2C_2^2))^2}{2(1 - C_3^2/(2C_2^2)) - (\gamma_1/\gamma_2 + \gamma_2/\gamma_1)C_2^2/C_1^2},$$

$$m_3 = \frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{V_0^*}{\pi} \frac{2\frac{C_2^2}{C_3}(1 - \frac{C_3^2}{2C_2^2})}{2(1 - \frac{C_3^2}{2C_2^2}) + (\frac{\gamma_1}{\gamma_2} + \frac{\gamma_2 C_2^2}{\gamma_1 C_1^2})}, \quad C_1 = 1,87C_2,$$

$$\varphi^* = \arctg \left[ \frac{2(z_0 + z)\gamma_1 C_3 t}{r^2 + \gamma_1^2(z_0 + z)^2 - C_3^2 t^2} \right], \quad \varphi_0 = \arctg \left[ \frac{C_3 t}{\gamma_1(z_0 + z)} \right],$$

$$r_0 = \sqrt{\gamma_1^2(z_0 + z)^2 + C_3^2 t^2},$$

$$r_1 = [\gamma_1^2(z_0 + z)^2 + r^2 - C_3^2 t^2]^2 + 4\gamma_1^2(z_0 + z)^2 C_3^2 t^2,$$

$$\gamma_1 = \sqrt{1 - C_3^2/C_1^2}, \quad \gamma_2 = \sqrt{1 - C_3^2/C_2^2},$$

$$C_1 = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}}, \quad C_2 = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\nu)}}, \quad C_3 = 0,927C_2,$$

$$\varphi_1 = \arctg \left[ \frac{2(\gamma_1 z_0 + \gamma_2 z) C_3 t}{r^2 - C_3^2 t^2 + (\gamma_1 z_0 + \gamma_2 z)^2} \right], \quad \varphi_{01} = \arctg \left( \frac{C_3 t}{\gamma_1 z_0 + \gamma_2 z} \right),$$

$$r_{01} = \sqrt{(\gamma_1 z_0 + \gamma_2 z)^2 + C_3^2 t^2},$$

$$r_2 = [(\gamma_1 z_0 + \gamma_2 z)^2 + r^2 - C_3^2 t^2]^2 + 4(\gamma_1 z_0 + \gamma_2 z)^2 C_3^2 t^2.$$

Выражение (4) описывает распространение продольной волны со скоростью  $C_1$ . Параметры этой волны формируются дельта-функцией Дирака с крутым фронтом нарастания и спада, большими амплитудами. Эта волна опережает в своем движении волну Рэлея, двигающуюся со ско-

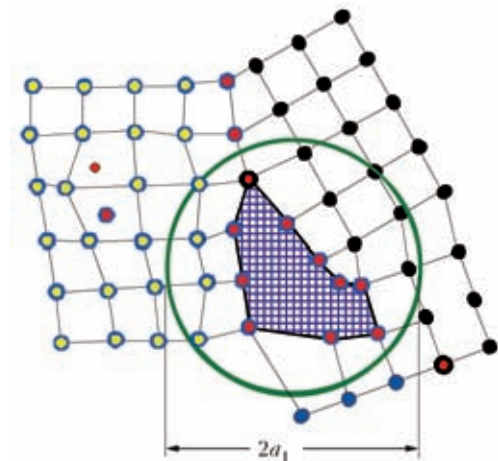


Рис. 5. Микротрещина на границе трех кристаллов с дефектами структуры



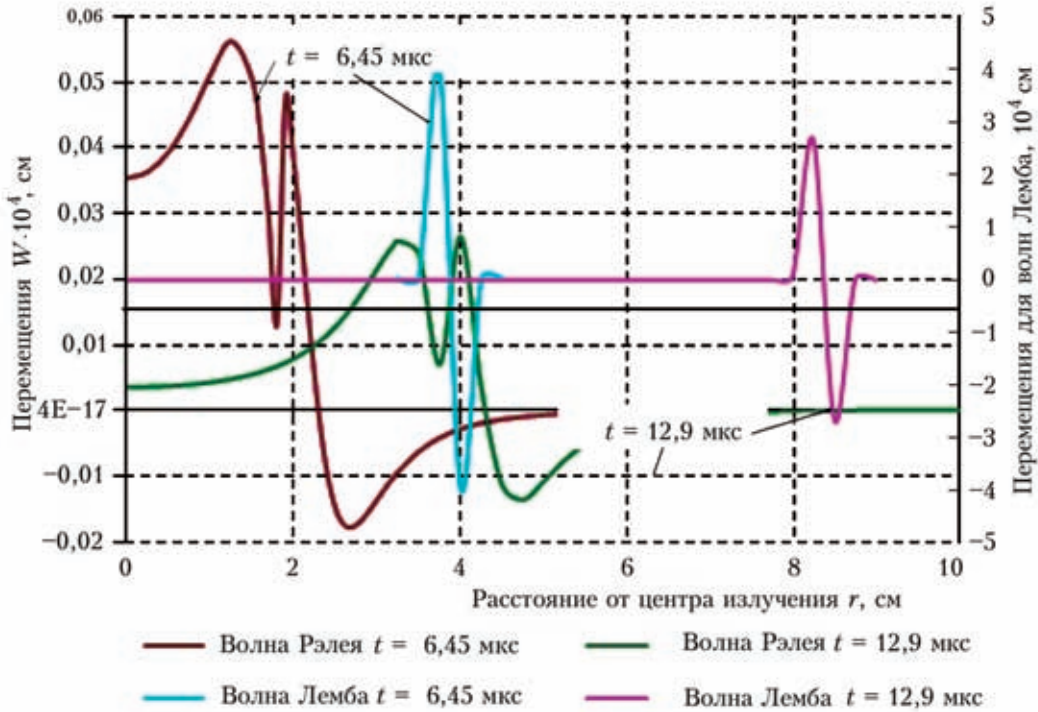


Рис. 6. Волны АЭ на поверхности полупространства от действия мгновенного источника излучения для двух разных моментов времени

ростью  $C_3$ , описываемую выражениями (5) и (6). Волна Рэлея имеет меньшие амплитуды. Передний фронт волны становится более пологим с увеличением  $z_0$ , а ее амплитуды очень сильно зависят от глубины залегания дефекта в отличие от продольной волны, где эта зависимость незначительна. Анализируя выражение (4), нетрудно заметить, что возникновение источника деформации на поверхности пластины приводит к генерированию на ней лишь одной волны — волны Рэлея.

Во втором случае, когда дефект внезапно образовался или внезапно начал развиваться существующий дефект, распространение волн может быть описано источником излучения (1), где вместо функции  $\delta_+(t)$  подставлена функция  $S_+(t - t_0)$  при  $t_0 = 0$ , описывающая излучение источника, связанное только с его возникновением (рис. 5). При этом исходное уравнение (3) для  $z_0 > z$  примет несколько иной вид:

$$\bar{w} = -\frac{1 + \nu}{1 - \nu} \frac{V^*}{4\pi} \times \left[ 1 + \frac{2\alpha\beta_1\beta_2 + (\alpha^2 + \beta_2^2)(\alpha^2 + p^2/(2C_2^2))}{\Delta} e^{-2\beta_1 z} - 4\alpha^2 \frac{\alpha^2 + p^2/(2C_2^2)}{\Delta} e^{-(\beta_1 + \beta_2)z} \right] \frac{e^{-\beta_1(z_0 - z)}}{p},$$

$$w_1 = -\frac{1 + \nu}{1 - \nu} \frac{V^*}{4\pi} \frac{(z_0 - z)}{(z_0 - z)^2 + r^2} \times \left[ \delta'_+ [C_1 t - \sqrt{(z_0 - z)^2 + r^2}] + \frac{S_+ [C_1 t - \sqrt{(z_0 - z)^2 + r^2}]}{\sqrt{(z_0 - z)^2 + r^2}} \right], \tag{8}^1$$

$$w_2 = \frac{m_2}{C_3} \left[ \frac{(z_0 + z)\gamma_1}{[(z_0 + z)^2 \gamma_1^2 + r^2]^{3/2}} - \frac{r_0}{r_1^{3/4}} \cos \left( \frac{3}{2} \varphi^* - \varphi_0 \right) \right],$$

$$w_3 = -\frac{m_3}{C_3} \left[ \frac{z_0 \gamma_1 + z \gamma_2}{[(z_0 \gamma_1 + z \gamma_2)^2 + r^2]^{3/2}} - \frac{r_{01}}{r_2^{3/4}} \cos \left( \frac{3}{2} \varphi_1 - \varphi_{01} \right) \right],$$

где  $w = w_1 + w_2 + w_3$ ;  $V^*$  — мгновенное изменение объема материала в точке с координатами, определенными произведением дельта-функций Дирака;  $V^* = \frac{4}{3} \pi a_1^3$ ;  $S_+$  — единичная функция (в расчетах, графики которых приведены на рис. 6 и 7, принято  $a_1 = 0,045$  см и  $t_1 = 0,07$  с).

Изменение волнового поля на поверхности толстой пластины в зависимости от времени и расстояния до источника излучения  $z_0$  рассчитывалось для двух случаев: действие мгновенного источника деформации и действие внезапно образовавшегося источника. Первый случай характеризует перемещение дефекта без изменения его размеров. Во втором случае происходит либо образование нового дефек-

<sup>1</sup> В коэффициенты  $m_2$  и  $m_3$  формул (8) вместо  $V_0^*$  подставить  $V^*$

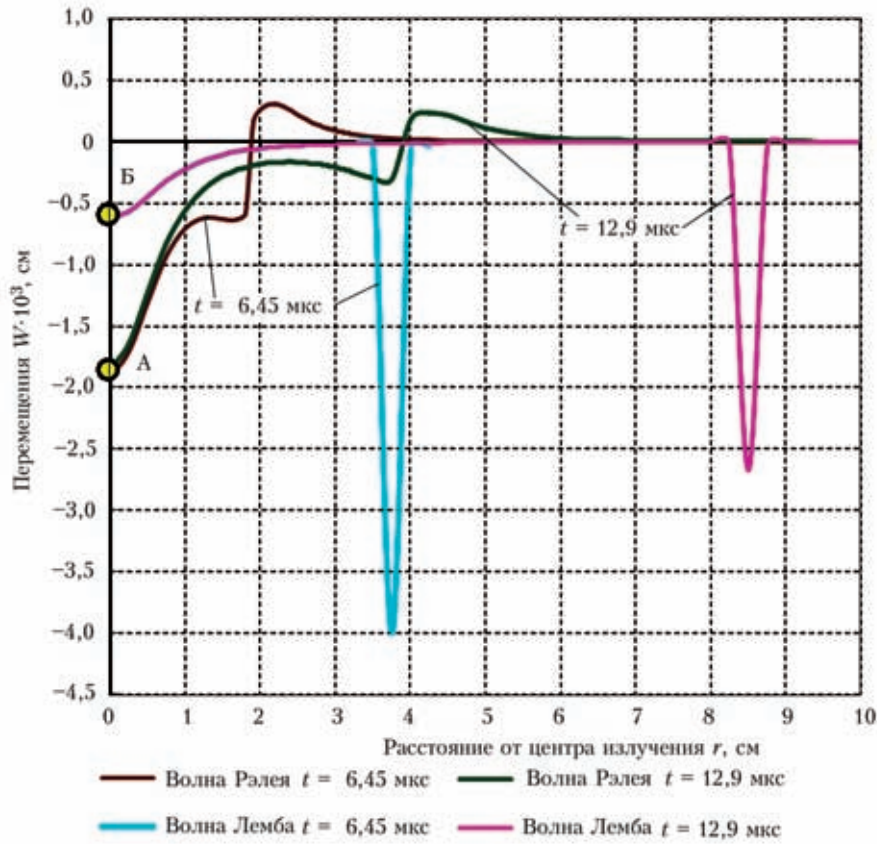


Рис. 7. Волны АЭ на поверхности полупространства от действия возникшего и развивающегося дефекта для двух разных моментов времени

та, либо изменение размеров существующего при перемещении в новое положение. Оба графика (рис. 6 и 7) показывают, как и какое излучение АЭ происходит в этих случаях.

Анализируя графики, можно обнаружить существенное различие в квантах излучения для двух разных случаев разрушения материалов. В случае простого перемещения дефекта на поверхность пластины выходит квант излучения в виде цилиндрической волны, имеющей явно выраженный циклический характер как для волны Рэля, так и Лемба. Значение перемещений в точке излучения уменьшается по мере продвижения волны и при времени, равном 12,9 с для рассматриваемого случая (рис. 6) они составляют незначительную величину и с дальнейшим увеличением времени становятся равными нулю. В случае изменения размеров дефекта или образования нового циклического наблюдается только для волны Рэля, в то время как волна Лемба изгибает пластину только в одном направлении. Анализируя первый член перед скобками в первой формуле (8) и первые члены в скобках двух других формул, можно отметить, что эти члены описывают стационарную часть волны, не зависящую от времени. Особенность этого случая заключается в том, что в точке излучения фиксируется величина, пропор-

циональная среднему радиусу и глубине залегания дефекта, образовавшегося в пластине (точки А и В на рис. 7). Эта величина не изменяется с изменением координат движущегося волнового фронта. Используя разные пары датчиков в измерительной розетке и формулы (4)–(6), (8), можно определить величины  $V_0^*$ ,  $V^*$  и  $z_0$  по параметрам волны Рэля и Лемба. Таким образом, представленная картина волнообразования в толстой пластине позволяет по форме волн судить о типе дефекта, возникшего в материале и его размерах и в первом приближении определять степень опасности процессов, протекающих в материале.

При вычислении значения  $w$  символические функции  $\delta_+(\cdot)$  и  $\delta'_+(\cdot)$  заменяли функцией  $\frac{a}{\pi} \exp[-a^2(C_1 t - \sqrt{z_0 - z})^2 + r^2]$  при  $a \rightarrow \infty$  и ее производной. Это, естественно, не позволяет сравнивать между собой амплитуды продольных волн и волн Рэля, так как  $\delta_{\pm}$  функции при равенстве нулю выражения в скобках стремятся к бесконечности. Замена позволила лишь сравнительно несложно построить функции с использованием ЭВМ и проследить степень затухания продольных волн при их движении вдоль радиуса  $r$  в пределах одного  $z_0$ . Расчеты показали, что продольная волна



затухает более интенсивно по мере продвижения вдоль радиуса  $r$  по сравнению с волной Рэлея. Следует также отметить, что волновое поле, созданное образующимся дефектом (рис. 7), имеет значительно более высокие параметры волны, чем поле от перемещающегося дефекта (рис. 6).

## Выводы

1. Разрушение материалов конструкций начинается в момент, когда сочетание группы негативных факторов, определяющих работоспособность материала, достигает критического значения и носит дискретный характер.

2. Разрушение сопровождается выделением квантов энергии, что приводит к появлению волн деформаций (АЭ).

3. Форма и параметры волн АЭ строго соответствуют процессам разрушения, протекающим в материале конструкции, и несут информацию о степени опасности и области, в которой происходит разрушение, а также позволяют судить о типе и размерах развивающихся или возникающих дефектов. В то же время выводы пунктов 1 и 2 дают возможность при контроле избежать необходимости выявления точных размеров дефектов, а следить лишь за результатом действия негативных факторов по появившейся упругой волне АЭ на поверхности пластины.

4. Поле волн АЭ, образованное возникшим новым или развивающимся дефектом, характеризуется значительно большими амплитудами по сравнению с полем, образованным существующим перемещающимся дефектом.

5. Разрешающая способность метода АЭ достаточна для регистрации дискретных процессов в материалах на уровне скачкообразного перемещения групп дислокаций.

6. В толстых пластинах, которые можно рассматривать как полупространство, генерируются две цилиндрические волны АЭ — волна Рэлея и волна Лемба. Последняя уменьшается с приближением источника возбуждения к поверхности пластины и исчезает, если источник волны возникает на ее поверхности.

7. Параметры волн АЭ, вызванных образованием или развитием дефектов для пластин большой толщины, могут быть подсчитаны по приведенным формулам.

1. Андрейкив А. Е., Лысак Н. В. Метод АЭ в исследовании процессов разрушения. — Киев: Наук. думка, 1989. — 176 с.

2. Грешников В. А., Дробот Ю. Б. Акустическая эмиссия для испытаний материалов и изделий. — М.: Изд-во стандартов, 1976. — 273 с.
3. Деч Г. Руководство к практическому применению преобразований Лапласа и Z-преобразований. — М.: Наука, 1971. — 288 с.
4. Ионов В. Н., Селиванов В. В. Динамика разрушения деформируемого тела. — М.: Машиностроение, 1987. — 272 с.
5. Механіка руйнування і міцність матеріалів / Під заг. ред. В. В. Панасюка. — Т. 5. — Неруйнівний контроль і технічна діагностика / Під ред. З. Т. Назарчука. — Львів: ФМІ, 2001. — 1132 с.
6. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: Индпром, 2008. — 814 с.
7. Недосека А. Я., Недосека С. А. Акустическая эмиссия и ресурс конструкций (Обзор) // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2008. — № 2. — С. 3–11.
8. Панасюк В. В., Андрейкив А. Е., Партон В. З. Основы механики разрушения материалов // Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пособие. — В 4-х т. / Под общ. ред. В. В. Панасюка. — Т.1. — Киев: Наук. думка, 1988. — 488 с.
9. Патон Б. Е., Лобанов Л. М., Недосека А. Я. Техническая диагностика: вчера, сегодня и завтра // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2003. — № 4. — С. 6–10.
10. Патон Б. Е., Недосека А. Я. О новых подходах в оценке состояния сварных конструкций // Там же. — 2000. — № 3. — С. 45–48.
11. Скальський В. Р. Оцінка накопичення об'ємної пошкодженості твердих тіл за сигналами акустичної емісії // Те саме. — 2003. — № 4. — С. 29–36.
12. Черепанов Г. П. Квантовая механика разрушения // Проблемы прочности. — 1990. — № 2. — С. 3–9.
13. Balderston H. L. The broad range detection of incipient failure using the acoustic emission phenomena. Acoustic emission // ASTM STP505, American Society for Testing and Materials. — 1972. — P. 297–317.
14. Gillis P. P. Dislocation motions and acoustic emission // A symposium presented at the December Committee Week American Society for Testing and Materials. — Bal Harbour, 7–8 Dec., 1971. — P. 20–29.
15. Nakamura Y., Veach C. L., McCauley B. O. Amplitude distribution of acoustic emission signals // A symposium presented at the December Committee Week American Society for Testing and Materials. — Bal Harbour, 7–8 Dec., 1971. — P. 164–186.
16. Pao Y. H., Gajevski R. R. Generalized ray theory and transient response of layered elastic solids // Physical acoustics. — 1997. — Т. 3. — № 6. — P. 184–265.
17. Paton B. E., Nedoseka A. J. Diagnostic of designs and safety of an environment // The Report on intern. conf. «The Human factor and environment». — Intern. Institute of Welding, July 19–20 1999 г., Lisbon, Portugal.
18. Richard L., Pao Y.-H. Spectra of transient waves in elastic plates // J. Acoust. Soc. Am. — 1982. — 72, № 6. — P. 1933–1941.
19. Tetelman A. S., Chow R. Acoustic emission testing and micro cracking processes // A symposium presented at the December Committee Week American Society for Testing and Materials. — Bal Harbour, 7–8 Dec., 1971. — P. 30–40.
20. Pao Y.H., Gajevski R.R., Ceranoglu A.N. Acoustic emission and transient waves in an elastic plate // J. Acoust. Soc. Am. — 1979. — 65, № 1. — P. 96–105.



# МЕТОДИКА РАНЖИРОВАНИЯ КОРРОЗИОННЫХ ДЕФЕКТОВ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ, ОБНАРУЖЕННЫХ ПРИ ВНУТРИТРУБНОЙ ДИАГНОСТИКЕ

В. И. МАХНЕНКО, А. С. МИЛЕНИН, О. И. ОЛЕЙНИК

*Разработана универсальная методика ранжирования дефектов магистральных газопроводов, обнаруженных при внутритрубной диагностике с позиций очередности ремонта под давлением. Подход основан на вероятностном анализе риска разрушения трубопровода с дефектами в процессе эксплуатации. Посредством численной реализации предложенной методологии разработан пользовательский программный модуль.*

*Разработана универсальная методика ранжирования дефектов магистральных газопроводов, обнаруженных при внутритрубной диагностике с позиций очередности ремонта под давлением. Методика основана на вероятностном анализе риска разрушения трубопровода с дефектами в процессе эксплуатации. Посредством численной реализации предложенной методологии разработан пользовательский программный модуль.*

Бесперебойное функционирование магистральных газопроводов (МГ) является важной технической задачей, требующей комплексного подхода. Один из обязательных этапов поддержания работоспособности МГ — периодическая диагностика дефектов и их своевременный ремонт.

В настоящее время все большее распространение получает ремонт МГ без вывода их из эксплуатации [1, 2], что позволяет существенно сократить время простоев (это особенно важно в случае одностороннего МГ), значительно уменьшить загрязнение окружающей среды, связанное с очисткой внутренней стенки при традиционных методах ремонта. Кроме того, создаются предпосылки для перехода от капитального к равномерно распределенному во времени плановому ремонту обнаруженных дефектов. Однако при этом возникает ряд особенностей, среди которых следует отметить необходимость ранжирования обнаруженных при диагностике дефектов МГ с позиций очередности их ремонта.

Современные стандарты и нормы по допустимости выявленных геометрических аномалий МГ [3–6 и др.] предполагают достаточно грубое ранжирование в зависимости от их формы, размеров и условий эксплуатации, заключающееся в разделении их на группы: допустимые, подлежащие ремонту и подлежащие первоочередному ремонту [3]; незначительные, докритические, критические и закритические [4]; опасные (фиксированный балл, характеризующий опасность дефектов группы — 16), потенциально опасные (8) и неопасные (1) [5].

Подобные подходы к ранжированию характерны не только для нормативных документов Украины и России, но и других стран [6] и доста-

точно при принятии решения о фактической допустимости конкретного дефекта, а также при использовании традиционных методов ремонта трубопроводов с выведением дефектного участка из эксплуатации. В случае ремонта МГ под давлением и при большом количестве дефектов, обнаруженных при внутритрубной диагностике (ВТД), как показано на рис. 1 по данным работы [7] и результатам ВТД, проведенной в 2004 г. на участке МГ «Уренгой–Центр 2», ранжирование согласно [3–6] не позволяет обоснованно планировать ремонт. Следует отметить, что в работе [3] предусматривается определенный расчет степени опасности обнаруженных дефектов, на основе которого можно детально проводить ранжирование. Однако методика такого расчета отсутствует.

В работе [5] к указанному выше ранжированию дефектов с указанием основных характерных баллов опасности предлагается еще дополнительная оценка по условиям трассы с корректирующими

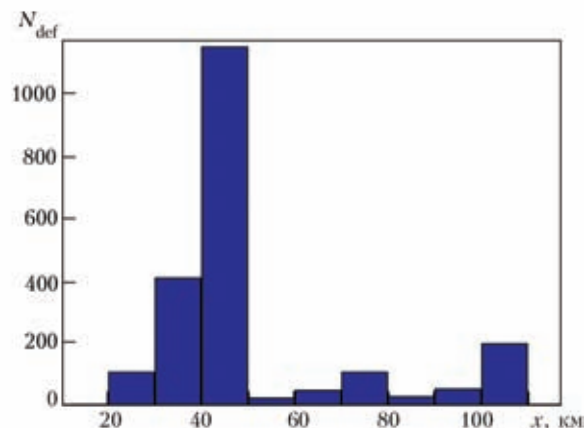


Рис. 1. Распределение количества дефектов потери металла  $N_{def}$  на участке МГ «Уренгой–Центр 2» [7]





Таблица 1. Оценка опасности дефектов в зависимости от трассовых условий

Особенности трассы	Корректирующий балл
Переходы:	
через реки, авто- и железные дороги	2
то же на расстоянии 500...1000 м	1
> 1000 м	0
Пересечения с другими трубопроводами:	
есть	2
нет	0
Близость населенных пунктов:	
в радиусе 1000 м	2
1000...2000 м	1
>2000 м	0
Состояние наружной изоляции:	
плохое	2
удовлетворительное	1
хорошее	0
Агрессивность грунтов:	
высокая	2
средняя	1
низкая	0
Электрохимическая защита:	
нет	1
есть	0
Участок трубопровода:	
начальный (до первого крана)	2
средний	1
отдаленный от компрессорной станции	0

баллами (табл. 1). Сумма основного и корректирующего баллов дает количественную оценку опасности (ранг) дефекта. Такой подход существенно расширяет возможности ранжирования. Однако этот анализ по косвенным показателям является далеко не всегда эквивалентным риску отказа, связанным с нарушением целостности в области дефекта за период ожидания в очереди на ремонт.

Более последовательным с этой точки зрения является документ [4], где предусмотрен расчет остаточного ресурса для обнаруженных дефектов. В основу этого подхода положен детерминированный расчет предельного состояния в области дефекта типа потери металла (утонения) или трещина с учетом возможности подрастания за определенное время. Здесь следует отметить следующее:

детерминированный подход при использовании данных ВТД, полученных современными диагностическими приборами, при коэффициентах безопасности, соответствующих проектным

расчетам, дает результаты, трудно сравнимые особенно для дефектов различного типа;

применяющийся в работе [4] критерий предельного состояния для трещиноподобных дефектов не соответствует современным представлениям о хрупко-вязком разрушении (процедура R6 и подобные [6 и др.]);

использование для предельного состояния в зоне дефектов утонения деформационной теории вязкого разрушения, когда критические деформации определяются на основе простейших соотношений теории малых упругопластических деформаций и достигают при этом существенных значений, вызывает недоверие к получаемым результатам на фоне современных возможностей использования теории пластического течения, реализуемой с помощью многочисленных коммерческих программных пакетов.

С учетом сказанного выше, в данной работе, выполняемой в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины в рамках создания комплексной системы планирования ремонтов МГ без вывода их из эксплуатации, разработана методика ранжирования дефектов на основе расчетной вероятности нарушения целостности стенки трубы в зоне каждого обнаруженного дефекта. Характерной особенностью данной методики является учет стохастичности значений исходных данных, полученных при ВТД.

Современные внутритрубные диагностические снаряды (в частности, фирмы «Rosen») отличаются достаточно высокой чувствительностью к аномалиям геометрии трубопровода, тем не менее погрешность определения размеров обнаруживаемых дефектов может быть значительной, особенно в радиальном направлении [8, 9]. Кроме того, существует естественный функциональный и пространственный разброс значений таких свойств материала, как скорость поверхностной коррозии  $W$ , скорость распространения трещин  $V$ , а также критическое  $K_{IC}$  значение коэффициента интенсивности напряжений в области трещиноподобных дефектов и пороговое значение  $K_{ISCC}$  на диаграмме статической коррозионной трещиностойкости (рис. 2).

Так как разброс значений указанных выше величин носит стохастический характер, для оценки безопасности эксплуатации газопровода с обнаруженными дефектами был предложен вероятностный подход, основанный на методе Монте-Карло [10], а именно:

исходя из известных плотностей распределения исходных данных, находится репрезентативная выборка их конкретных значений в известных диапазонах варьирования;

на основе детерминированных критериев разрушения определяется допустимость обнаруженного дефекта для каждого набора геометрических

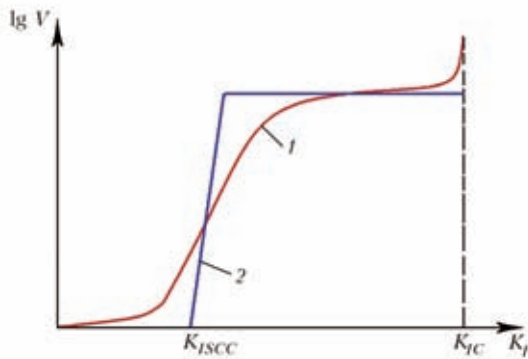


Рис. 2. Схема статической диаграммы коррозионной трещиностойкости конструкционного материала: 1 — экспериментальная диаграмма; 2 — идеализированная

и эксплуатационных характеристик из репрезентативной выборки;

из значения частоты выполнения детерминированного критерия допустимости дефекта определяется вероятность разрушения в области рассматриваемого дефекта;

на базе выбранной длины ремонтируемого участка МГ анализируется распределение суммарного риска разрушения в течение выбранного периода времени эксплуатации.

Наиболее распространенными дефектами коррозионного характера являются утонения (потери металла) (рис. 3) и стресс-коррозионные трещины (рис. 4) на внешней стороне газопровода в местах нарушения изоляции [5]. В общем случае, геометрия такого рода дефектов достаточно разнообразна, но все они могут быть схематизированы. Так, согласно данным работы [11], геометрическими характеристиками поверхностной трещины являются глубина  $a$  и полудлина  $c$ , утонения — минимальная измеренная толщина стенки газопровода в зоне дефекта  $\delta_{\min}$ , его максимальный аксиальный  $s$  и тангенциальный  $u$  размеры. Эти геометрические характеристики дефектов определяются при внутритрубной диагностике, распределения значений каждой из них  $X_i$  могут быть описаны с помощью усеченного нормального закона:

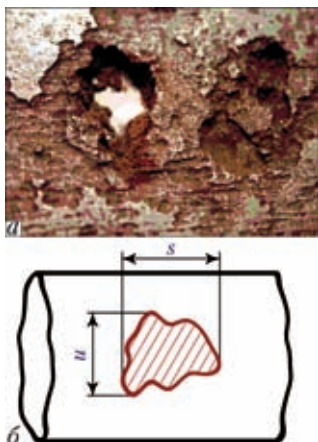


Рис. 3. Внешний вид (а) и схема дефекта утонения на поверхности газопровода (б)

$$\varphi_i(X_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \xi_i S_i} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{X_i - \bar{X}_i}{\xi_i} \right)^2 \right] \text{ при } A \leq X_i \leq B,$$

$$S_i = \int_A^B \frac{dX_i}{\sqrt{2\pi} \xi_i} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{X_i - \bar{X}_i}{\xi_i} \right)^2 \right], \quad (1)$$

где  $\bar{X}_i$  — математическое ожидание величины  $X_i$  ( $A \leq X_i \leq B$ );  $\xi_i$  — стандартное отклонение.

Функциональная зависимость вероятности  $i$ -й характеристики принять значение  $X_i$  вычисляется следующим образом:

$$P(X_i) = \int_A^{X_i} \varphi_i(X) dX. \quad (2)$$

Следует отметить, что с помощью уравнений (1), (2) могут быть описаны распределения не только размеров обнаруженных дефектов, но и скорости поверхностной коррозии. Что касается величин  $K_{IC}$  и  $K_{ISCC}$ , вероятность принять конкретное значение  $X_i$  для этих характеристик традиционно описывается трехпараметрическим законом Вейбулла:

$$P(X_i) = 1 - \exp \left[ -\left( \frac{X_i - X_0}{X_d - X_0} \right)^\eta \right], \quad (3)$$

где  $X_d$ ,  $X_0$ ,  $\eta$  — параметры распределения Вейбулла.

В качестве детерминированного критерия разрушения трещинообразного дефекта при эксплуатации МГ предлагается использовать двухпараметрический критерий хрупко-вязкого разрушения, имеющий следующий вид [6]:

$$Y = f(L_r) - K_r, \quad (4)$$

где

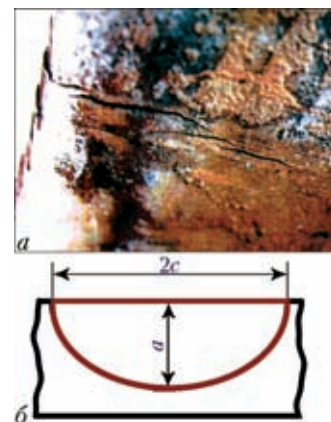


Рис. 4. Внешний вид (а) и схема трещины стресс-коррозии на поверхности газопровода (б)





Т а б л и ц а 2. Характеристики модельных дефектов утонения

Номер дефекта	s, мм	u, мм	$\delta_{\min}$ , мм	Положение дефекта, м
1	330	200	16	2
2	210	200	16,8	250
3	350	350	15,7	450
4	400	350	15,1	600
5	380	460	15,5	900

$$f(L_r) = \begin{cases} (1 - 0,14L_r^2) [0,3 + 0,7 \exp(-0,65L_r^6)] \\ \text{при } L_r \leq L_r^{\max} = \frac{\sigma_B + \sigma_T}{2\sigma_T}, \\ 0 \text{ при } L_r > L_r^{\max}; \end{cases} \quad (5)$$

$$K_r = K_I / K_{IC}; \quad L_r = \frac{\sigma_{\text{ref}}}{\sigma_T}.$$

( $K_I$  — коэффициент интенсивности напряжений в рассматриваемой точке контура поверхностной полуэллиптической трещины;  $\sigma_{\text{ref}}$  — реферативное напряжение в области дефекта, методика расчета которого приведена, в частности, в работе [11]).

Соответственно, условие  $Y > 0$  является достаточным для гарантированной допустимости рассматриваемого дефекта.

При анализе допустимости трещинообразного дефекта через определенный период времени  $\Delta t$  необходим учет возможности роста трещины, а именно

$$\begin{aligned} a(\Delta t) &= a_0 + V_a \Delta t, \\ c(\Delta t) &= c_0 + V_c \Delta t, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $a_0, c_0$  — начальные размеры дефекты;  $V_a, V_c$  — скорости роста трещины вдоль соответствующего размера.

Значения  $V_a, V_c$  могут быть оценены следующим образом:

$$V_i(K_I) = \begin{cases} V_{\max}, & \text{если } K_I \geq K_{ISCC}, \\ 0, & \text{если } K_I < K_{ISCC}, \end{cases} \quad (7)$$

где  $V_{\max}$  — максимальная скорость роста трещины, определяемая по диаграмме статической коррозионной трещиностойкости материала в данных условиях;  $i = a, c$ .

Оценка риска нарушения целостности МГ в области дефекта типа коррозионного утонения проводится на основе следующего детерминированного критерия [6]:

$$Y = \delta_{\min} - W\Delta t - \delta_p R_i, \quad i = s, u, \quad (8)$$

где  $\delta_p$  — минимальная допустимая толщина стенки газопровода, определяемая либо конструктивно-эксплуатационными требованиями к МГ на

Т а б л и ц а 3. Характеристики модельных трещинообразных дефектов

Номер дефекта	Тип трещины	c, мм	a, мм	Положение дефекта, м
6	Продольная	110	1,60	10
7	» »	90	1,60	400
8	Окружная	75	1,50	710
9	» »	150	1,55	820
10	Продольная	100	1,55	1000

рассматриваемом участке, либо дополнительным численным исследованием;  $R_i$  — функция формы дефекта утонения, имеющая следующее математическое выражение:

$$R_s = \begin{cases} 0,2, & \text{если } \lambda = \frac{1,285s}{\sqrt{D}\delta_p} \leq 0,3475, \\ \left(0,9 - \frac{0,9}{\sqrt{1,0 + 0,48\lambda^2}}\right) \left(1,0 - \frac{0,9}{\sqrt{1,0 + 0,48\lambda^2}}\right)^{-1}, & \text{если } \lambda > 0,3475, \end{cases} \quad (9)$$

$$R_u = \begin{cases} 0,2, & \text{если } \psi = \frac{u}{D} \leq 0,3475, \\ \frac{-0,73589 + 10,511\psi^2}{1,0 + 13,838\psi^2}, & \text{если } \psi > 0,3475, \end{cases}$$

где  $D$  — внутренний диаметр газопровода.

На основании результатов серии численных экспериментов в рамках репрезентативной выборки из входных параметров, распределенных согласно уравнения (1)–(3), находится частота выполнения критериев (4) для трещинообразных дефектов и (8) для утонений. Далее определяется риск разрушения  $j$ -го дефекта  $P_j(\Delta t)$  ( $j = 1 \dots J$ ) через некоторый промежуток времени эксплуатации  $\Delta t$ . Таким образом, по величине риска разрушения проводится ранжирование дефектов по приоритету ремонта.

Так как ремонт газопровода проводится на некотором участке определенной длины  $L_p$ , на котором ликвидируются все обнаруженные дефекты, важно выделить участки с наивысшим суммарным риском разрушения. Исходя из полученного распределения рисков разрушения каждого из дефектов газопровода, суммарный риск разрушения  $P_k^\Sigma$  на  $k$ -м участке длины  $L_p$  определяется следующим образом:

$$P_k^\Sigma(\Delta t) = 1 - \prod_{n=N_k}^{M_k} (1 - P_n(\Delta t)), \quad (10)$$

где ( $N_k, M_k$ ) — диапазон номеров дефектов, обнаруженных на  $k$ -м участке газопровода.

Приведенная методология анализа базы данных о дефектах, обнаруженных при внутритрубной диагностике МГ, была реализована в виде гра-



Т а б л и ц а 4. Значение параметров распределений свойств материала газопровода и размеров дефектов

Параметр	Нормальный усеченный закон распределения				Распределение Вейбулла		
	$\bar{X}$	$\xi$	$A$	$B$	$X_0$	$X_d$	$\eta$
$c$ , мм	$c'$	7,5	$c' - 15$	$c' + 15$	—	—	—
$a$ , мм	$a'$	0,03d	$a' - 0,1d$	$a' + 0,1d$	—	—	—
$s$ , мм	$s'$	15	$s' - 30$	$s' + 30$	—	—	—
$u$ , мм	$u'$	15	$u' - 30$	$u' + 30$	—	—	—
$\delta_{\min}$ , мм	$\delta'_{\min}$	0,03d	$\delta'_{\min} - 0,1d$	$\delta'_{\min} + 0,1d$	—	—	—
$W$ , мм/год	1	0,10	0,08	0,12	—	—	—
$V_{\max}$ , мм/год	4,4	0,22	4,0	4,8	—	—	—
$K_{ISCC}$ , МПа·мм <sup>0,5</sup>	—	—	—	—	63,3	686,2	4,0
$K_{IC}$ , МПа·мм <sup>0,5</sup>	—	—	—	—	632,5	3405,8	4,0

*Примечание.* Штрихом обозначены результаты экспериментальных измерений и справочные данные

Т а б л и ц а 5. Риск разрушения (приоритет ремонта) модельных дефектов в процессе эксплуатации\*

Номер дефекта	Время эксплуатации, лет				
	0	0,5	1,0	1,5	2
1	0,0 (7)	0,00025 (9)	0,0055 (9)	0,052 (9)	0,179 (9)
2	0,0 (7)	0,0 (10)	0,0015 (10)	0,0142 (10)	0,063 (10)
3	0,0 (7)	0,00125 (8)	0,026 (8)	0,131 (8)	0,338 (7)
4	0,0041 (5)	0,0562 (3)	0,240 (4)	0,490 (4)	0,758 (4)
5	0,0 (7)	0,007 (7)	0,0715 (7)	0,263 (7)	0,494 (7)
6	0,0130 (1)	0,139 (1)	0,436 (1)	0,796 (1)	0,979 (1)
7	0,0050 (2)	0,0962 (2)	0,269 (2)	0,600 (3)	0,864 (3)
8	0,0010 (6)	0,0353 (6)	0,0612 (5)	0,462 (5)	0,720 (5)
9	0,0040 (3)	0,054 (4)	0,251 (3)	0,317 (2)	0,9369 (2)
10	0,0020 (5)	0,0412 (5)	0,177 (6)	0,419 (6)	0,715 (6)

\* В скобках указана очередность ремонта

фического пользовательского модуля. В качестве примера ниже приведены результаты расчета характерных модельных дефектов, размеры которых приведены в табл. 2, 3. Геометрические и эксплуатационные параметры исследуемого линейного участка МГ следующие: длина участка  $L$ , м — 1200; внутренний диаметр, мм — 1420; толщина стенки  $d$ , мм — 20; минимальная допустимая толщина стенки, мм — 16; температура, °С — 30; материал газопровода — сталь 17Г1С:  $\sigma_T = 360$  МПа;  $\sigma_B = 510$  МПа; давление на входе исследуемого участка  $P_{\max}$ , МПа — 7,5; давление на выходе исследуемого участка  $P_{\min}$ , МПа — 6,5.

Параметры распределенных стохастическим образом величин согласно (4) и (8) приведены в табл. 4.

Распределение аксиальных  $\sigma_{zz}$  и тангенциальных  $\sigma_{\varphi\varphi}$  напряжений в стенке газопровода по его длине принято следующим:

$$\sigma_{zz} = \frac{\left(\frac{P_{\min} - P_{\max}}{L}x + P_{\max}\right)D}{4d},$$

$$\sigma_{\varphi\varphi} = \frac{\left(\frac{P_{\min} - P_{\max}}{L}x + P_{\max}\right)D}{2d},$$
(11)

где  $x$  — расстояние от начала участка газопровода до исследуемого поперечного сечения.

Значения риска разрушения каждого из модельных дефектов в процессе эксплуатации МГ и приоритет их ремонта согласно приведенным выше методикам показаны в табл. 5 и рис. 5. Из приведенных в табл. 5 данных видно, что при указанных параметрах распределения геометрических размеров дефектов, близких к таковым по результатам современной ВТД, вероятности отказов достаточно высоки по сравнению, например, с результатами, приведенными в работе [12], основанными на стационарных измерениях. Тем не менее,

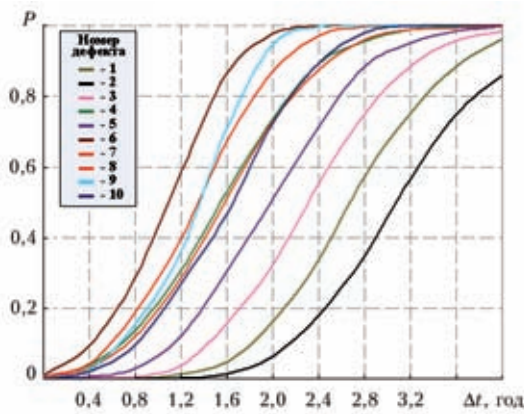


Рис. 5. Изменение риска нарушения целостности стенки газопровода в области модельных дефектов 1–10 в зависимости от времени эксплуатации

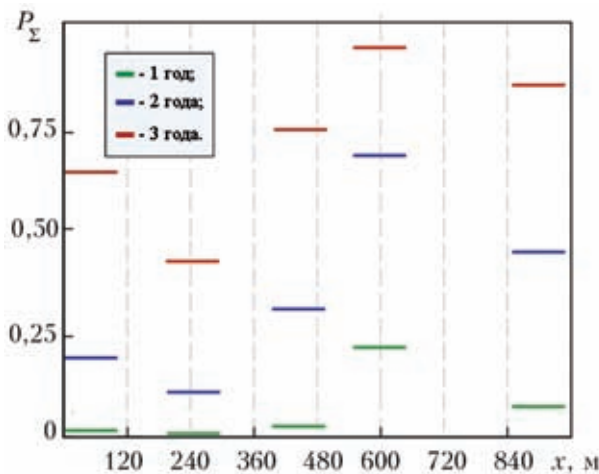


Рис. 6. Распределение величины суммарного риска разрушения на ремонтируемом участке длиной 100 м по длине газопровода  $x$  через различные периоды времени эксплуатации

такой достаточно консервативный подход позволяет получить четкую градиацию и, соответственно, порядок их ремонта.

На рис. 6 показаны результаты расчета риска разрушения по участкам ремонта на базе 100 м согласно уравнению (10). Из этих данных можно сделать вывод, что кинетика увеличения риска разрушения в случае отдельного дефекта и суммы дефектов по фиксированной длине участка МГ сходны, однако в обоих случаях имеются свои особенности. Приведенные на рис. 6 распределения рисков отличаются большей дискретностью по пространственной характеристике и при этом сохраняют непрерывность во времени эксплуатации газопровода с дефектами, что особенно ценно в случае необходимости ремонта большого количества дефектов.

**Выводы**

Разработана методология ранжирования дефектов линейной части МГ, обнаруженных при ВТД. В основу предложенного подхода положен анализ непрерывного изменения во времени риска нарушения целостности стенки газопровода, что позволяет реализовывать схемы ремонта на основе любого количества уровней приоритета.

На основе результатов численных исследований разработан подход, позволяющий определить наиболее опасные участки газопровода с точки зрения риска возникновения аварийной ситуации в выбранный промежуток времени эксплуатации.

На примере численного исследования газопровода с дефектами продемонстрирован характер изменения во времени риска аварии как в области конкретных дефектов, так и отдельных участков длиной 100 м, и показана эффективность предложенной методики ранжирования.

1. Математическое моделирование язвенных дефектов на действующих нефте- и газопроводах и разработка численного метода оценки допустимых режимов дуговой заварки таких дефектов / В. И. Махненко, В. С. Бут, Е. А. Великоиваненко и др. // Автомат. сварка. — 2001. — № 11. — С. 3–10.
2. Бут В. С., Галеев М. Н., Шведчикова Л. А. Определение несущей способности стенки трубы в процессе дуговой сварки конструктивных элементов на газопроводе под давлением // Диагностика, надежность, техн. обслуживание и ремонт нефтепроводов: Сб. научн. тр. — Уфа: ВНИИСПТнефть, 1990. — С. 105–111.
3. ВБН В.3.1-00013471-07:2007. Магістральні нафтопроводи. Методи ремонту дефектних ділянок. — Київ: Мін-во палива та енергетики України, 2007. — 112 с.
4. ВРД 39-1.10-004-99. Методические рекомендации по количественной оценке состояния магистральных газопроводов с коррозионными дефектами, их ранжирования по степени опасности и определению остаточного ресурса. — М.: ПО «Спецнефтегаз», 2000. — 52 с.
5. ВРД 39-1.10-001-99. Руководство по анализу результатов внутритрубной инспекции и оценке опасности дефектов. — М.: ВНИИГАЗ, 2000. — 52 с.
6. Fitness-for-Service. American Petroleum Institute. Recommended Practice 579. First ed. — Washington: API Publications and Distribution, 2000. — 625 p.
7. Оценка изменения стресс-коррозионной повреждаемости по результатам повторной внутритрубной диагностики / И. А. Долгов, В. А. Горчаков, Ю. П. Сурков и др. // Дефектоскопия. — 2007. — № 1. — С. 16–26.
8. Beuker T. A. Clever combination // World Pipelines. — 2007. — № 8. — P. 37–41.
9. Russell A., Paeper S. Geometric capabilities // Ibid. — 2008. — № 8. — P. 79–85.
10. Раїзер В. Д. Методы теории надежности в задачах нормирования расчетных параметров строительных конструкций. — М.: Стройиздат, 1986. — 190 с.
11. Махненко В. И. Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций. — Киев: Наук. думка, 2006. — 619 с.
12. Махненко В. И., Великоиваненко Е. А., Олейник О. И. Риск-анализ как средство формализации принятия решений о внеплановом ремонте сварных конструкций // Автомат. сварка. — 2008. — № 5. — С. 5–10.



## ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ В УПРУГОЙ ОБЛАСТИ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ НЕРАВНОВЕСНЫХ ПРОЦЕССАХ

Н. Г. ЧАУСОВ, В. Б. БЕРЕЗИН, М. Н. БОНДАР

*Рассмотрено деформирование материалов разных классов в упругой области при динамических неравновесных процессах (хаотическая динамика). Выявлены специфические колебательные процессы в материалах при одностадийных и многостадийных исследуемых сложных режимах нагружения с максимальными амплитудами колебаний от  $-1,18$  до  $+0,63$  % деформации, вследствие которых при последующем статическом растяжении материала заметно ослабляются механические свойства.*

*Deformation of different classes of materials in elastic zone at dynamical nonequilibrium processes (chaotic dynamics) is studied. Specific oscillating processes are revealed in materials at single-stage and multi-stage complex loading modes with maximal amplitudes of deformation oscillation from  $-1,18$  to  $+0,63$  %, which lead to significant lowering of mechanical properties under next statical loading.*

На кафедре сопротивления материалов Национального университета биоресурсов и природопользования Украины проводятся исследования деформирования пластичных материалов при динамических неравновесных процессах (хаотическая динамика). Они базируются на фундаментальных результатах брюссельской научной школы во главе с И. Пригожиным, в которых впервые показано, что в условиях нелинейной динамики в любых физико-химических системах происходит процесс самоорганизации структуры, при котором проявляются новые фундаментальные свойства вещества в условиях сильного отклонения от равновесия [1–3].

Применительно к механическим системам авторами впервые разработана методика механических испытаний пластичных материалов, позволяющая реализовать и регулировать начальными условиями энергетический обмен в замкнутой системе, и, таким образом, исследовать механическое поведение материалов в условиях хаотической динамики [4]. Указанный эффект достигается как за счет реализации конкретного сложного режима нагружения, так и в результате некоторых конструктивных особенностей механической нагружающей системы [5].

Выполненные на данном этапе исследования позволили установить, что во время динамических неравновесных процессов в пластической области материалов образуются диссипативные структуры в виде объемно-связанных, на различных масштабных уровнях, тонких полос (каналов), отличающихся рядом своеобразных свойств [5, 6]. В первую очередь следует обратить внимание на резкое увеличение пластичности при существенном уменьшении сопротивления дефор-

мированию на стандартной восходящей ветви диаграммы деформирования практически для любого материала; достижение сверхпластичного состояния материала при комнатной температуре при многоразовых последовательных реализациях динамических неравновесных процессов, а также на то обстоятельство, что при последующем статическом растяжении механические свойства существенно отличаются от механических свойств материалов, полученных на тех же стадиях при «чистом» статическом растяжении.

В настоящей работе представлены новые оригинальные результаты, которые касаются деформирования материалов в упругой области при динамических неравновесных процессах. В качестве объекта исследования выбраны армо-железо (99,999 %), нержавеющая сталь и низкоуглеродистая сталь 20. Испытания проводили на специальных ступенчатых образцах, состоящих из последовательно соединенных основного образца (диаметром 8 мм и длиной 25 мм) и вспомогательного (диаметром 14...25 мм и длиной 64...130 мм) (рис. 1) в несколько этапов.

Образцы из нержавеющей и низкоуглеродистой стали изготавливали из прокатанного круглого профиля, а из армо-железа вырезали в поперечном направлении из круга диаметром 125 мм.

**Результаты экспериментов.** На первом этапе испытаний два идентичных экстензометра с базой 16 мм устанавливали по центру рабочего участка основного и вспомогательного образцов и при заданной степени пластической деформации при статическом растяжении образцы подвергали импульсной подгрузке.

Соответствующие развертки во времени падения напряжений на основном образце 1, скачко-

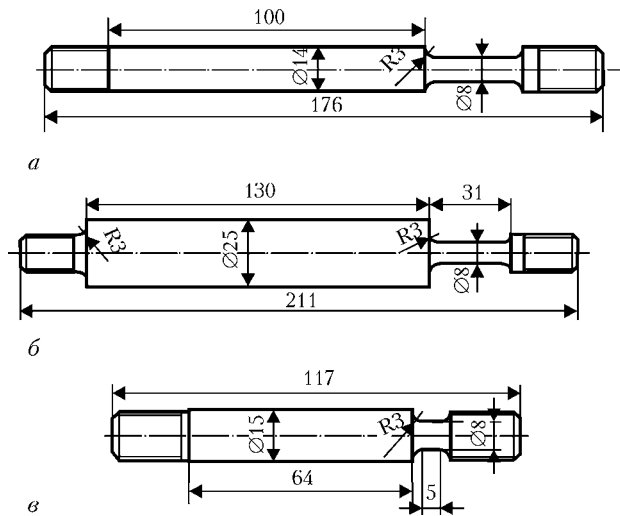


Рис. 1. Схемы образцов для испытаний: а — из нержавеющей стали; б — из низкоуглеродистой стали 20; в — из армо-железа

образного роста пластической деформации в продольном направлении  $\epsilon_1$  на рабочей части основного образца 2 и специфического деформационного колебательного процесса  $\epsilon_2$  на рабочей части вспомогательного образца 3 в процессе динамических неравновесных процессов для всех трех испытанных материалов представлены на рис. 2.

Анализ представленных данных указывает на две специфические особенности механического поведения материалов, находящихся в упругой области, при динамических неравновесных процессах.

Во-первых, в материалах происходят колебательные структурные перестройки, при которых уровень колебаний деформаций значительно превышает уровень деформации текучести материалов (0,2 %). Так, в частности, пиковые значения колебаний деформаций, соответственно, для нержавеющей, низкоуглеродистой стали и армо-железа соответственно (см. рис. 2):  $-0,14...+0,61$  %;  $-0,80...+0,18$  %;  $-0,85...+0,46$  %. Особое внимание следует обратить на тот факт, что в момент импульсных подгрузок уровень деформаций в образцах был значительно ниже деформации текучести, а после стабилизации колебательного процесса на вспомогательном образце в некоторых случаях даже фиксировались деформации сжатия (см. рис. 2).

Во-вторых, при резком падении напряжений на образцах (участки  $A_i B_i$  на рис. 2) экстензометр продольной деформации всегда фиксировал сжатие материала. Это может свидетельствовать только о том, что в процессе динамических неравновесных процессов образуется пространственная тонкополосная диссипативная структура [5, 6], при этом большая часть объема материала, находящегося между этой новой структурой, подвергается интенсивному сжатию. Такое возможно

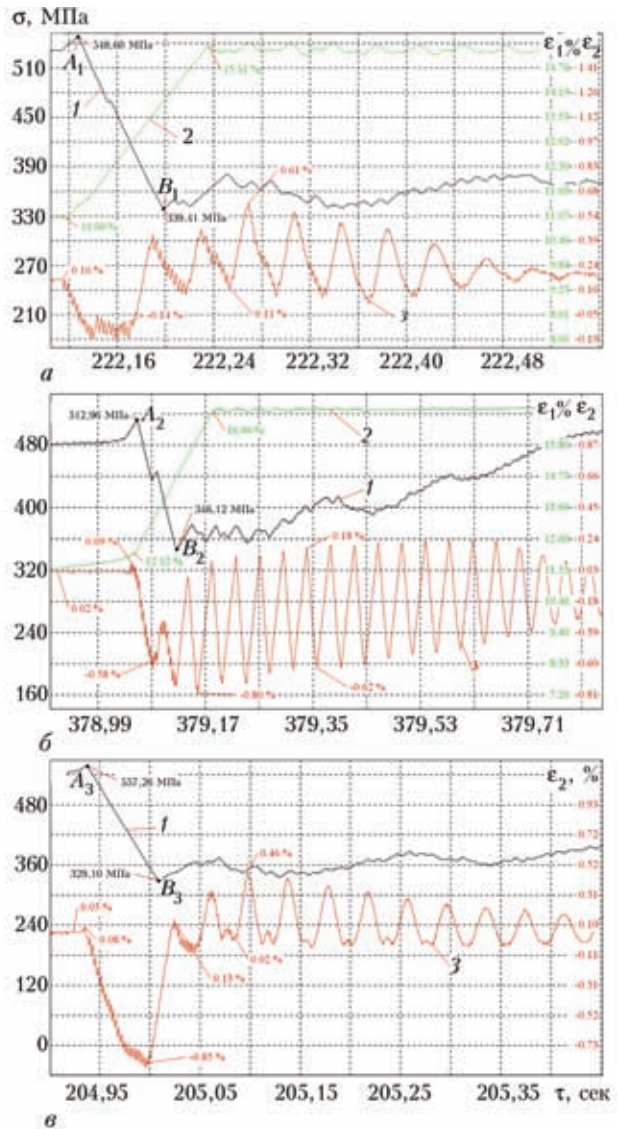


Рис. 2. Изменение механических характеристик материалов во времени в процессе динамических неравновесных процессов: а — нержавеющая сталь; б — низкоуглеродистая сталь 20; в — армо-железо (шкала  $\epsilon_1$  соответствует кривой 2;  $\epsilon_2$  — 3)

только в том случае, если образование пространственной диссипативной структуры связано с интенсивным локальным разогревом материала. Таким образом, вероятно, исследуемому процессу присущи большие градиенты температур внутри деформируемого объема материала.

На втором этапе исследований образцы подвергали повторным импульсным подгрузкам. При этом на вспомогательном образце фиксировали и продольную, и поперечную деформации. На рис. 3 для примера представлены результаты испытаний нержавеющей стали при трех последовательных импульсных подгрузках.

Отмечается полная синхронизация по времени деформации сжатия, фиксируемой в начальный момент передачи силового импульса на образец, как в поперечном, так и в продольном направле-



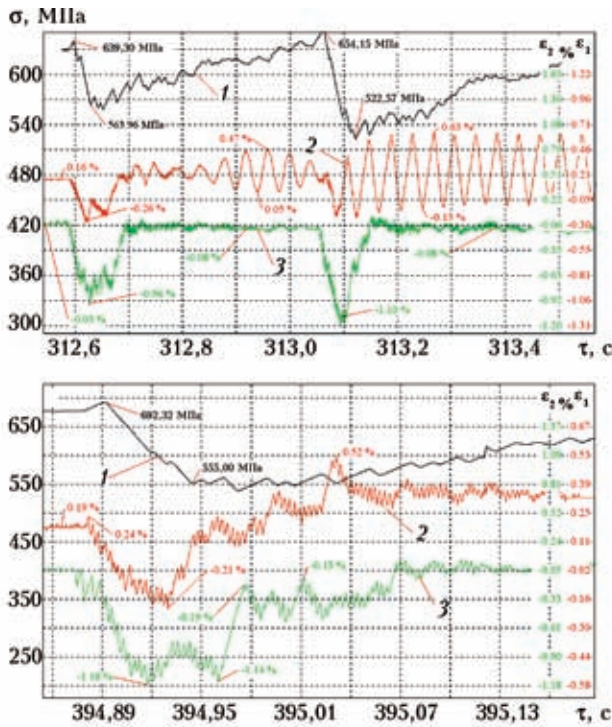


Рис. 3. Изменение механических характеристик нержавеющей стали во времени после многократных импульсных подгрузок: а — вторая и третья; б — четвертая; кривая 1 — падение напряжений на основном образце; 2, 3 — изменение продольной и поперечной деформации на вспомогательном образце (шкала  $\epsilon_1$  соответствует кривой 2;  $\epsilon_2$  — 3)

ниях. Таким образом, подтверждается, что образующая диссипативная структура — пространственная.

С учетом предыдущего импульса подгрузки на первом этапе испытаний наибольший деформационный колебательный процесс в продольном направлении вспомогательного образца отмечается после третьего импульса подгрузки (см. рис. 3, а), при этом пиковые значения колебаний деформаций зафиксированы в пределах  $-0,19...+0,63$  %.

Ранее нами экспериментально установлено, что после многократных последовательных импульсных подгрузок материал переходит в сверхпластичное состояние при комнатной температуре. В частности, для нержавеющей стали обнаруженный эффект фиксировался после трех импульсных подгрузок [6] (на аналогичное явление указывает рис. 3, б). Как видно из рисунка, колебательный процесс в продольном направлении вспомогательного образца после четвертого импульса подгрузки очень быстро затухает. Вероятно, новые структуры, позволяющие материалу переходить в сверхпластическое состояние, сформировались не только в основном, но и во вспомогательном образце. Об этом свидетельствуют участки диаграмм деформаций основного (кривая 1) и вспомогательного (кривая 2) образца из нержавеющей стали при

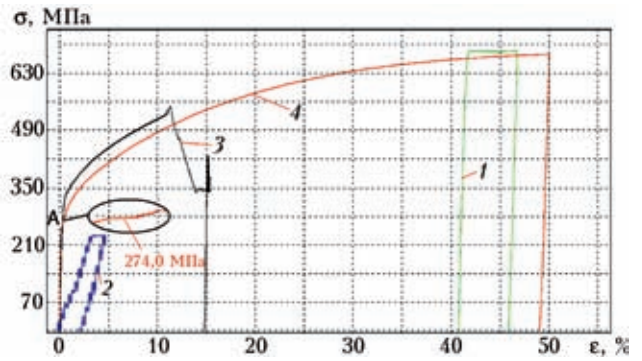


Рис. 4. Кривые деформаций основного и вспомогательного образца из нержавеющей стали при статическом растяжении после четырех последовательных импульсов подгрузки

повторном статическом растяжении после четырех импульсов подгрузки (см. рис. 4).

Даже при таком низком уровне напряжений ( $\sigma = 231,6$  МПа) материал вспомогательного образца деформируется практически при постоянном уровне напряжений (кривая 2 на рис. 4), причем фиксируется резкое уменьшение упругих характеристик материала. Для сравнения на рис. 4 представлена кривая 3, которая соответствует начальному участку статического растяжения материала с учетом первого импульса подгрузки. Далее образец окончательно разгружали, из вспомогательного образца изготавливали образец, аналогичный основному, выдерживали его в течение десяти дней для стабилизации релаксационных процессов, а затем повторно нагружали при статическом растяжении. Соответствующая кривая 4 приведена также на рис. 4.

Сопоставление кривых 3 и 4 приводит к важному выводу, что в результате многократных импульсных подгрузок в материале, находящемся в упругом состоянии, сформировалась новая, более «размягченная», структура, прочностные свойства которой значительно ниже прочности материала в исходном состоянии. Четко фиксируется площадка текучести (см. увеличенный участок *OA* на кривой 4 рис. 4), при этом соответствующий ей уровень напряжений ( $\sigma_T = 274$  МПа) уже превышает уровень напряжений на площадке текучести кривой 2. Полученные результаты подтверждают данные работ [7, 8] о том, что при изменении условий механического воздействия на материал структурная самоорганизация деформируемого объекта в виде качественно отличающейся структуры, способствующей деформации, происходит исключительно в процессе нагружения, а после прекращения действия нагрузки структура может подвергаться релаксационным изменениям.

Выявленный эффект необходимо учитывать при выборе допускаемых напряжений материала





конструкций, работающих в специфических условиях многократного импульсного воздействия.

## Выводы

Материал, находящийся в упругом состоянии, при многократных импульсных подгрузках способен к колебательным структурным перестройкам, в результате чего происходит самоорганизация структурного превращения и образуется диссипативная структура, прочность которой ниже исходной.

Экспериментально подтвержден факт перехода материала в сверхпластичное состояние при многократных импульсных подгрузках материала.

Образовавшаяся в результате многократных импульсных подгрузок пространственная диссипативная структура способствует пластическому течению материалов при резком падении напряжений. Следовательно, такие режимы нагружения материалов перспективны для технологических операций ударной штамповки 002Е.

1. Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. — М.: Мир, 1979. — 512 с.
2. Николис Г., Пригожин И. Познание сложного. Введение / Пер. с англ. — Изд. 2-е, стереот. — М.: Едиториал УРСС, 2003. — 344 с.
3. Пригожин И. От существующего к возникающему: Время и сложность в физических науках / Пер. с англ. — Изд. 2-е доп. — М.: Едиториал УРСС, 2002. — 288 с.
4. Установка для испытания материалов с построением полных диаграмм деформирования / Н. Г. Чаусов, Д. Г. Войтюк, А. П. Пилипенко, А. М. Кузьменко // Пробл. прочности. — 2004. — № 5. — С. 117–123.
5. Особенности деформирования пластичных материалов при динамических неравновесных процессах / Н. Г. Чаусов, Е. Э. Засимчук, Л. И. Маркашова и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2008. — № 4. — С. 54–62.
6. Особенности трансформации структуры пластичных материалов в процессе резких смен в режиме нагружения / Е. Э. Засимчук, Л. И. Маркашова, Т. В. Турчак и др. // Физическая мезомеханика. — 2009. — Т. 12. — № 2. — С. 77–82.
7. Коперативные деформационные процессы и локализация деформации / В. А. Лихачев, В. Е. Панин, Е. Э. Засимчук и др. — Киев: Наук. думка, 1989. — 320 с.
8. Zasimchuk E. E., Markashova L. I. Microbands in Rolling-deformed Nickel Single Crystals // Materials Sci. and Eng. — 1990. — A127. — P. 33–39.

Нац. ун-т биоресурсов и природопользования Украины,  
Киев

Поступила в редакцию  
09.06.2009

УДК 621.19.14

# НОВЫЕ РЕШЕНИЯ В НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

В. А. ТРОИЦКИЙ

*Успехи цифровой обработки визуальной информации, создание многофункциональных ПЗС-матриц, а также полупроводниковых пластин, способных сохранять скрытое радиографическое изображение и другие научные достижения убеждают в скором изменении объемов применения традиционных технических средств для неразрушающего контроля. Приводятся конкретные примеры принципиально новых технологических решений, которые в ближайшее время найдут широкое применение.*

*Advances in digital processing of visual information, development of multifunctional CCD-matrices, and semi-conductor wafers, capable of retaining the latent radiographic image and other most recent scientific achievements are a convincing proof of the forthcoming change of the scope of application of the traditional technical means of NDT. Specific examples of fundamentally new technological solutions are given, which will become widely applied in the near future.*

Интенсивное развитие цифровой, компьютерной, полупроводниковой техники оказало существенное влияние на развитие технологии и техники неразрушающего контроля (НК), выдвинуло решения, альтернативные традиционным.

В последние несколько лет началось массовое использование термографии как альтернативного метода многим традиционным видам НК. Основным преимуществом этого метода является его дистанционность, высокая чувствительность (различаются десятки доли градуса), возможность наложения оптического и термографического изображений,

решения задач, которые другими методами неразрешимы.

На рис. 1 показана часть американского спутника Шаттл [2], между секциями которого была несплошность, пропущенная при строгом визуальном контроле и обнаруженная на термограмме.

Современные инфракрасные системы контроля позволяют определять подповерхностные несплошности композитов, металлов и керамик, толщину образца, термическую диффузность, контролировать одновременно большие поверхности, а также криволинейные.

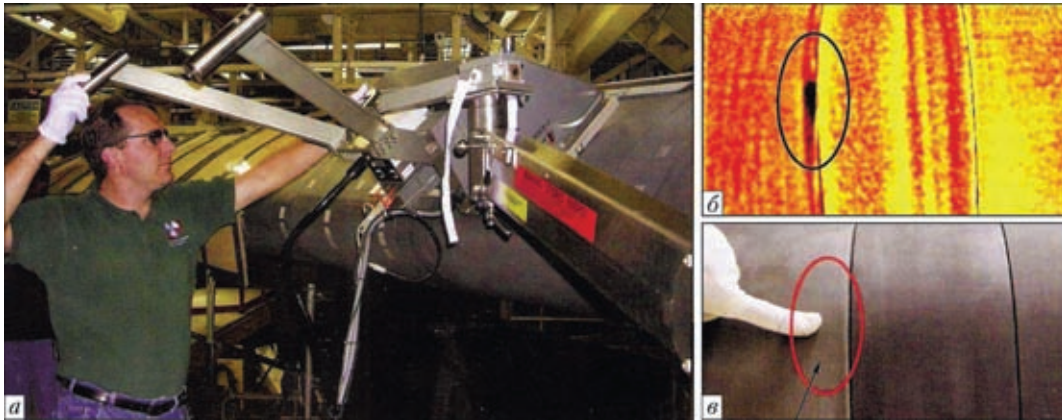


Рис. 1. Несплошность в обшивке Шаттла, пропущенная при визуальном и обнаруженная при термографическом контроле

Современная термография высокочувствительна, дает количественную оценку и воспроизводима, а для многих применений является альтернативой традиционным решениям в области НК.

На рис. 2 приведены три изображения одной и той же сотовой панели, выполненной из алюминия, графита и нескольких слоев эпоксидной смолы. Внутри панелей имеются посторонние включения. На рис. 2, *а* приведена термограмма, на рис. 2, *б, в* — соответственно радиографический снимок и УЗК-томограмма. Очевидно, что термограмма (рис. 2, *а*) более информативна. Не менее убедительны поиски с помощью термографии отслоений и деградации изоляции на теплотрассах.

Портативные тепловизоры уже широко применяются для поиска утечек тепла в зданиях, для дистанционного диагностирования электрооборудования и металлургических объектов. На очереди разработка методик обследования теплотрасс, магистральных трубопроводов, в том числе и на предмет обнаружения несанкционированных врезок в трубопроводы для отбора транспортируемого продукта. Различают пассивную и активную термометрию.

Суть метода «активной термографии» поясняется на рис. 3. Объект обследуется с помощью тепловизора, который перемещается одновременно с периодически включаемой лазерной вспыш-

кой, излучающей приблизительно 10 кДж в импульсе.

Появилась вибротермография, дающая возможность обнаружить малые скрытые трещины, которые невозможно определить с помощью других активных методов термографии. Здесь образец прозвучивается с частотой 15...30 кГц. Мощный акустический сигнал порядка 0,5...3 кВт приводит к фрикционному нагреву трущихся стенок закрытой трещины. Тепло избирательно указывает на наличие трещины в горячих точках. Обнаружение трещин с помощью вибротермографии сравнимо для некоторых материалов с капиллярной дефектоскопией.

Широко применяется термография для дистанционного определения состояния объектов в процессе их интенсивной нагрузки — вращающиеся турбины, электрические машины, элементы металлургического комплекса. В качестве примера приведем результаты, полученные техническим экспертом АЦНК им. Е. О. Патона НАН Украины А. Г. Бобошко при обследовании части оборудования Днепродзержинского цементного завода, в частности, двух вращающихся печей. Длина каждой печи составляет  $L = 117,6$  м, диаметр  $D = 3,5...4,0$  м. Остановка и пуск таких больших объектов — сложное и дорогостоящее мероприятие.

В ходе обследования было обнаружено значительное количество дефектов (гофры, выпучины,

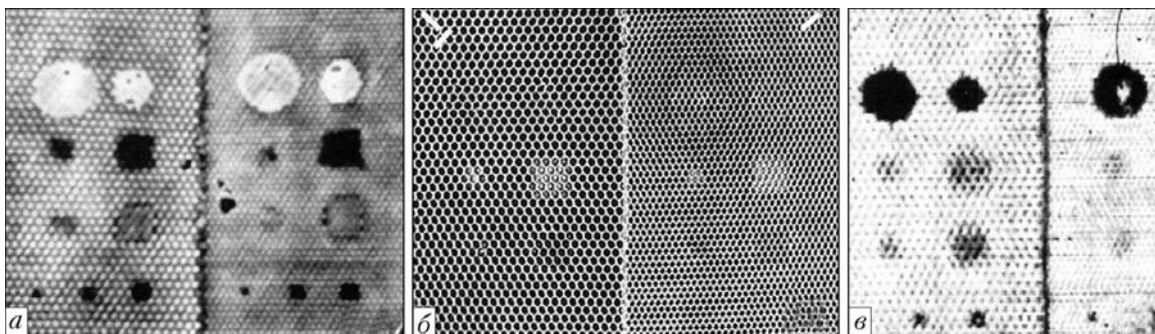


Рис. 2. Сравнение результатов обнаружения инородных включений, полученных различными методами, в пятислойном графитоэпоксидном ламинате, расположенном на сотовых алюминиевых панелях: *а* — термография; *б* — радиография; *в* — УЗК-томография



трещины сварных соединений и т. д.), которые возникли в процессе неправильной эксплуатации и некачественного ремонта, что привело к разрушению футеровки и деформации корпуса.

На работающей печи без ее остановки была проведена тепловизионная съемка камерой модели ТН 5100 фирмы «NEC» (Япония) с разрешением 0,1 °С.

Тепловизионная съемка позволила:

определить состояние футеровки по всей длине печи;

обнаружить участки основного металла и сварных швов, которые подверглись воздействию температур, превышающих допустимые значения (рис. 4, а);

определить зоны повышенной температуры в местах концентрации дефектов сварных соединений (рис. 4, в–е).

В дальнейшем при обследовании указанных выше участков после остановки печей другими методами НК в указанных технологических зонах были обнаружены трещины, непровары, различные несплошности.

Много новых технологических возможностей в последнее время появилось в области радиационного контроля сварных соединений.

В последние годы в качестве альтернативы рентгенографическим пленкам стали применяться кремниевые, фосфорные пластины многократного использования, имеющие большой динамический радиографический диапазон. Там, где ранее из-за разнотолщинности детали надо было делать 5...10 снимков, теперь это можно выполнить в одну экспозицию и при меньших энергиях. Фосфорные детекторы не требуют традиционных для рентгеновских пленок процедур и специализированных помещений. После экспозиции пластина помещается в сканер для считывания и цифровой обработки изображения. Часто этот метод называют цифровой радиографией. Он сочетает достоинства радиографии и рентгенотелевидения. Это, с одной стороны, присущие рентгенотелевидению оперативность контроля, электронная обработка и архивирование изображений, исключение расходных материалов и процессов химической обработки, с другой — возможности исследования объектов любой конфигурации, а также приближения приемника излучения вплотную к объекту как при съемке на пленку.

По своему динамическому диапазону этот метод превосходит не только рентгенотелевизионный, но и радиографию. С его помощью возможна регистрация изобра-

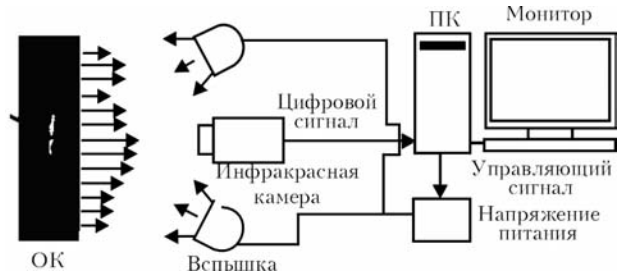


Рис. 3. Схема выполнения активной термографии

жения объекта с большим перепадом толщин за одну экспозицию с последующим просмотром участков различной оптической плотности с помощью регулировок яркости и контраста изображения. Это открывает новые технологические возможности в радиографии. Так появилась возможность реализовывать тангенциальное просвечивание [5] тел вращения (сосудов, трубопроводов и т. п.), что практически нереализуемо при традиционной пленочной радиографии. Из-за большой разнотолщинности тел вращения в прямом (по оси пучка) и тангенциальном (косом) направлении

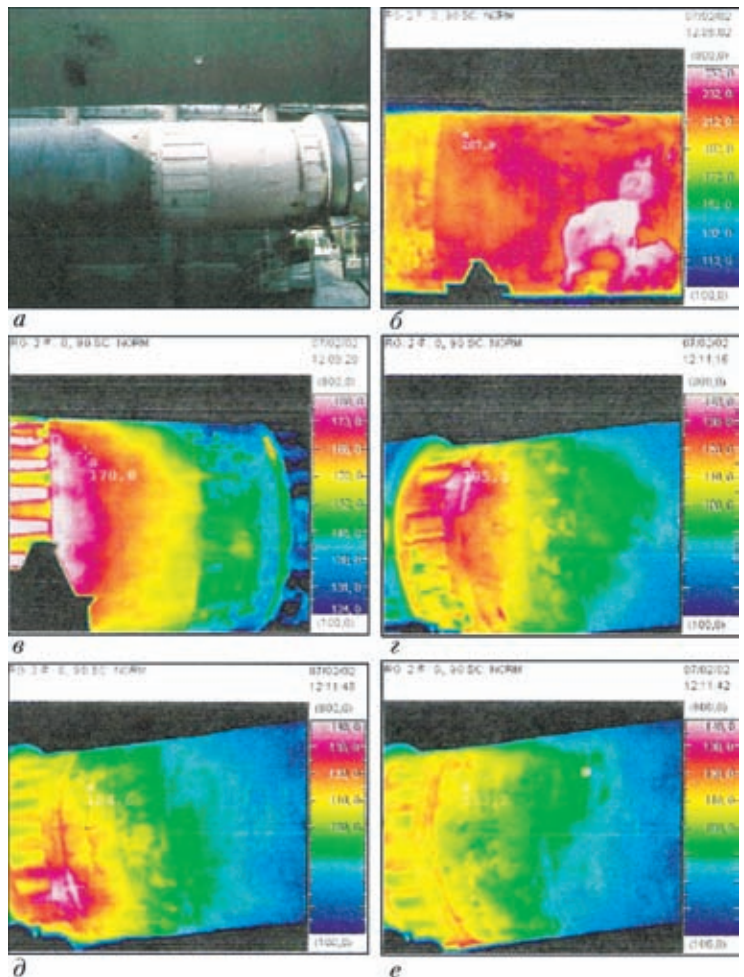


Рис. 4. Цементная печь (а) и термограммы участков с разрушающейся футеровкой (б), зон повышенной температуры в местах концентрации дефектов сварных соединений (в–е)



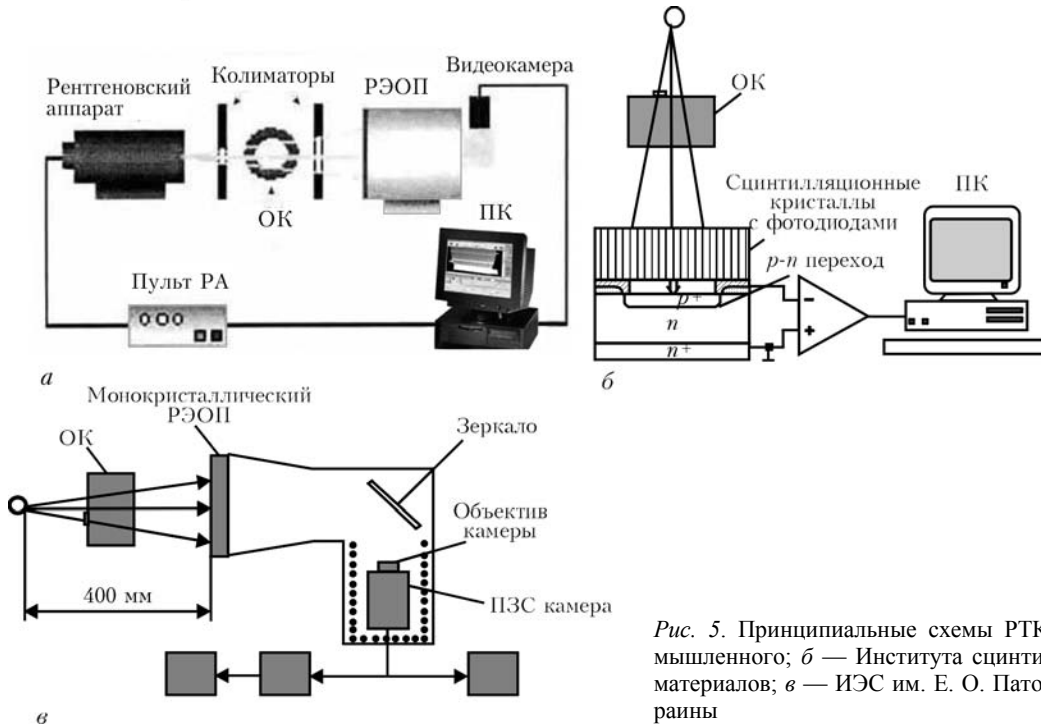


Рис. 5. Принципиальные схемы РТК: а — промышленного; б — Института сцинтилляционных материалов; в — ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины

этот метод [5] практически до сегодня не применяется, хотя он очень интересен в информационном отношении. Тангенциальное просвечивание может дать информацию о расслоении металла, его утонении, наличии инородных сред малой плотности внутри объекта и т. д.

Быстрое развитие цифровой фотографии, технологий выращивания флуоресцирующих монокристаллов дают основание полагать, что в ближайшее десятилетие будет сильно потеснена традиционная радиография в любом ее проявлении.

Альтернативой радиографии станет радиоскопия. Радиографические задачи будут решаться радиоскопическими методами. В настоящее время уже реально создавать портативную радиоскопическую, рентгенотелевизионную аппаратуру на порядок более компактную, чем эксплуатируемые в настоящее время установки.

На рис. 5 приведены три принципиальные схемы рентгенотелевизионного контроля (РТК). На рис. 5, а представлена схема аппаратуры, которой укомплектованы все заводы, производящие мас-

совые металлоконструкции (трубы, баллоны и т. п.). Здесь основным элементом является вакуумная электронная техника РЭОП, преобразующая прошедшее радиационное излучение в видимое изображение, которое далее передается оператору. Более прогрессивная система РТК (рис. 5, б) воспринимает прошедшее излучение с помощью полупроводниковых преобразователей, электронных коммутаторов, формирующих изображение просвечиваемого объекта. Устройство по рис. 5, б, преобразующее прошедшее излучение в видимое изображение, содержит большое количество миниатюрных детекторов на основе сцинтилляционных кристаллов, контактирующих с фотодиодами.

Структурная схема одного из каналов детектора представлена на рис. 6. Сцинтилляционные кристаллы 1 обычно выполняют из иодида цезия и натрия (CsI, NaI). Контактующие с ними полупроводниковые фотодиоды, например, из кремния *n*-типа с имплантатом *p*-типа, компактны и имеют высокий квантовый выход в широком спектральном диапазоне.

Такие системы РТК разрабатываются в Институте сцинтилляционных материалов НАН Украины под руководством проф. В. А. Рыжикова. Они нашли применение в медицине и в таможенном деле.

Более прогрессивным принципом РТК является схема (рис. 5, в) с использованием цифровой фотографии и монокристаллических сцинтилляционных кристаллов без их дробления на мелкие элементы. На рис. 5, в изображена принципиальная схема устройства РТК, состоящая из монокристаллического сцинтилляционного кристалла диаметром 5...10 см,

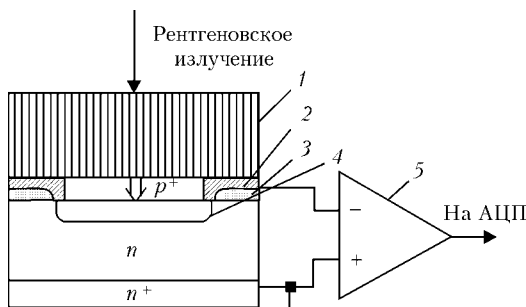


Рис. 6. Структурная схема детектора сцинтиллятор-фотодиод: 1 — сцинтиллятор; 2 — металлический контакт; 3 — SiO<sub>2</sub>; 4 — *p-n*-переход; 5 — предварительный усилитель



зеркала, оптики и ПЗС-матрицы. После оптики, перед прибором с зарядной связью — ПЗС-матрицей — располагается диафрагма. ПЗС-матрица состоит из светочувствительных кремниевых диодов. Когда свет, отражаемый зеркалом, достигает ПЗС-матрицы, он заряжает каждый из ее элементов — пикселей. ПЗС-матрица имеет размеры порядка  $1\text{ см}^2$ , поэтому изображение на обратной стороне сцинтилляционного кристалла, имеющего размеры порядка  $100\text{ см}^2$ , концентрируется с помощью оптического объектива. ПЗС-матрица имеет порядка нескольких миллионов пикселей, поэтому и достигнутая разрешающая способность значительно выше, чем в схемах на рис. 5 и 6. Уже сегодня разрешающая способность схемы РТК по рис. 5, в приближается к возможностям рентгеновской пленки. Цифровая фотография интенсивно развивается, появляются все более совершенные ПЗС-матрицы, алгоритмы обработки информации, карты памяти и т. д. Поэтому можно ожидать, что по своим радиографическим возможностям РТК по схеме рис. 5, в может превзойти рентгеновские пленки. Отсутствие промежуточных носителей и малые размеры устройства при равных возможностям программного продукта, который используется для обработки изображения, дает существенные преимущества РТК по рис. 5, в перед современными фосфоматическими преобразователями.

Условно габаритные размеры упомянутых систем радиационного контроля представлены на рис. 7.

Наименьшими размерами характеризуется система РТК (рис. 5, в), основанная на монолитном кристалле, ПЗС-матрице и технике цифровой фотографии. Существует еще одно важное обстоятельство, которое свидетельствует о возможности замены радиографии в любом ее варианте на РТК по предлагаемой компактной схеме (рис. 5, в). Если на радиографическом снимке подобно фотопленке можно различить 30 пар черно-белых линий на 1 мм, то использование программного обеспечения True Pic и ПЗС-матриц в современных цифровых аппаратах позволяет различить до 150 аналогичных пар линий на 1 мм. Таким образом, потенциально разрешающая способность РТК-технологий на описанной основе ПЗС-матриц может быть выше, чем при пленочной радиографии.

Кроме исключения промежуточного носителя (детектора) в виде пленки или фосфоматической пластины в случае РТК (рис. 5, в), а также высокой разрешающей способности, можно будет значительно экономить время контроля за счет того, что документироваться теперь будут только те участки сварного соединения, где есть недопустимые дефекты. Изображения участков шва с безопасными несплошностями после просмотра записывать не будут, так как в этом нет необходи-

мости. При промежуточных носителях информации (пленках, пластинах) это сделать невозможно. Информация, записанная на промежуточном носителе, должна быть изучена и стерта, промежуточный носитель должен быть подготовлен к следующей экспозиции. Поэтому предлагаемая портативная рентгентелевизионная техника (рис. 5, в) будет вытеснять радиографию прежде всего там, где большие объемы радиационного контроля. Это заводы, производящие металлоконструкции, судостроение, магистральные и распределительные трубопроводы.

Имеется большое количество второстепенных трубопроводов, свай, тросов, прибрежных металлоконструкций, которые в настоящее время практически не контролируются. Для таких объектов весьма перспективна низкочастотная (НЧ) ультразвуковая дефектоскопия [5–9].

При низкочастотном УЗК не требуется очищать всю поверхность объекта. Достаточно только небольшого участка, чтобы установить низкочастотную УЗ-антенну. Так можно диагностировать участки протяженностью до 200 м.

Производительность низкочастотного метода на несколько порядков выше высокочастотного УЗК, а стоимость контроля на порядок ниже. В ближайшие годы низкочастотный УЗК должен найти широкое применение [8, 9].

Практика предупреждения серьезных аварий на нефте- и газопроводах показала, что традиционных средств и методов УЗК недостаточно. Покажем это на примере двух серьезных аварий, произошедших на нефтепроводах Аляски.

Данные аварии побудили правительство США к поиску нетрадиционных методов диагностики трубопроводов. Аналогичные исследования проводятся в отделе № 4 ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, по электромагнитоакустическим (ЭМА) и низкочастотным ультразвуковым технологиям. Сочетание ЭМА и НЧ открывает новые возможности для УЗК.

В августе 2006 г. крупная нефтяная компания США пережила второй инцидент, связанный с аварией на нефтепроводе, что нарушило экологи-

Вакуумная техника (рис. 5, а)	Многоэлементные полупроводниковые преобразователи (рис. 5, б)
	Кремниевые и фосфоматические пластины
	Преобразователи на ПЗС-матрицах (рис. 5, в)

Рис. 7. Условные габаритные размеры устройств, обеспечивающих получение радиационных изображений с использованием разных электронно-оптических преобразователей (РЭОП)



чески хрупкую природу Аляски. Обе аварии были результатом внутренней питтинговой коррозии на нефтепроводах в четыре нитки диаметром 0,85 м. По этим линиям транспортируется 400 000 баррелей нефти в день. После первой аварии четыре нитки нефтепровода были проверены традиционным ручным и автоматизированным УЗК. Обнаруженные зоны повреждений были отремонтированы.

Вторая авария немедленно закрыла поставки нефти в 48 штатов на продолжительное время, пока не был выполнен полный повторный НК нефтепровода.

После отключения четырехниточного нефтепровода Министерство транспорта США выдало предписание о срочном УЗК всех четырех ниток нефтепроводов в зоне секторов от 4 до 8 ч, т. е. для ускорения процесса НК отказалось от исследований верхней части нефтепровода. Контроль с помощью традиционного УЗК потребовал удаления полиуретановой изоляции и подготовки под контроль поверхности труб. Для выполнения этого задания потребовалось большое количество специалистов по УЗК и рабочих, занимающихся изоляцией. Только для работы по УЗК необходимо было 108 рабочих. Поэтому необходимо было изучить альтернативные методы сплошного НК, которые будут по точности не ниже традиционных. Требуемые экспресс-методы сплошного НК должны были позволить выявить внутренние поверхностные коррозионные язвы с 50 % утонением стенки при соотношении геометрических размеров в плане 3:1. После того, как произошла вторая авария, требования к НК еще более ужесточились. Теперь потребовали обеспечения 100%-го выявления любой несплошности. Для выполнения традиционного УЗК каждая нитка трубопровода была разделена на контролируемые участки по 0,3 м, что привело к созданию 52 000 отдельных участков. Участки проверяли с помощью ультразвука в нижней полости нефтепровода, где постоянно находится нефть с агрессивными примесями. Группа из 108 специалистов традиционным УЗК проверяла в среднем 283 сегмента в день. Были применены традиционные ручной и автоматизированный УЗ контроль.

Скорость автоматизированного УЗК была равна от 4,5 до 6,0 м на команду в смену — неожиданно низкая, так как требовались дополнительные уточнения и ручное сканирование. Если бы не был найден успешный альтернативный низкочастотный метод УЗК, то контроль 52 000 участков занял бы 184 дня.

Кроме традиционного УЗК с использованием пьезоизлучателей по зачищенной поверхности были проведены испытания с применением электромагнитоакустических преобразователей (ЭМАП), которые не требовали такой зачистки. Было опреде-

лено, что ЭМА-технология позволяет выявлять утонение стенки более чем на 30 % на расстоянии 0,5 м от опоры. С применением ЭМАП позже было приостановлено снятие изоляции. Далее выполнялся уже автоматизированный УЗК на основе ЭМАП через антикоррозионное покрытие толщиной 4 и 8 мм. Было установлено, что испытания с помощью ЭМАП по изолированной трубе полностью эквиваленты контролю обнаженной трубы, что существенно ускорило процесс диагностирования. Удалось таким образом ускорить диагностирование, но этого было недостаточно. Проблему решил только метод низкочастотного ультразвука. Низкочастотный УЗК позволил сохранить пороги выявления несплошностей при десятикратном увеличении производительности.

Если ЭМАП-технология широко распространена в США и признана в документе ASTM E1816, то технология низкочастотного УЗК не имеет пока в США стандартов и тем не менее была использована для диагностики этого нефтепровода.

Предварительно работоспособность ЭМАП и оборудования для низкочастотного электромагнитоакустического контроля (НЧЭМК) оценивали в реальных полевых условиях. Для предварительных испытаний был выбран трубопровод диаметром 0,75 м, который сначала подвергался испытаниям с помощью внутритрубного снаряда с тем, чтобы найти участки с питтинговой коррозией. Далее проводили компьютерную радиографию, с помощью которой получили изображения питтинговой коррозии. После этого ручные УЗ испытания позволили получить точные данные о питтинге и его геометрических размерах. Для установления пределов выявляемых отношений геометрических размеров несплошностей для каждого метода использовали широкий диапазон размеров, глубин и морфологий коррозионных язв.

В результате полевых испытаний получили следующие результаты:

ЭМАП обеспечил 100 % выявления питтинга при 25%-м утонении стенки и отношении размеров дефектов в плане 3:1 на стенке толщиной 9 мм трубы без изоляции;

ЭМАП выявил 30 %-ное утонение стенки при отношении размеров дефектов в плане 4:1 на стенке толщиной 9 мм изолированной трубы;

10 % сигналов ЭМАП были ложными положительными (такие избыточные результаты не ухудшают выявление дефектов при контроле ЭМАП, но требуют уточнения с помощью других методов НК); возможность команды из двух человек с помощью ЭМАП проверить 300 м трубы в день без изоляции и 150 м в день трубы, покрытой изоляцией;

технология низкочастотного ЭМАП дает изображение всего контролируемого сегмента 4...8 ч большей протяженности;





после окончания работ с ЭМАП необходимо было выполнять уточняющие УЗ измерения толщины обычным методом;

НЧЭМК продемонстрировал 100%-ю выявляемость изолированного питтинга при потере 25 % толщины стенки при отношении размеров дефекта в плане 3:1;

результаты НЧЭМК, полученные на зачищенной поверхности, не изменились на трубе, покрытой антикоррозионной изоляцией.

НЧЭМК дает результаты лучше, чем автоматизированный УЗК или ЭМАП при изоляции из фторполимера. При этом длина объекта, проконтролированного командой из двух человек, использующей ручной прибор для НЧЭМК из-за вспомогательных операций не превышает 60 м в день. При автоматизации и улучшенных креплениях для датчиков НЧЭМК производительность сканирования повысилась до 3 м/мин, т. е. за рабочий день удалось контролировать более 1 км трубы.

До появления ЭМАП и НЧЭМК, альтернативного традиционным технологиям НК, сотни съемщиков изоляции, очистителей изоляции и техников УЗК работали одновременно 24 ч в сутки. Новые альтернативные методы ЭМАП и НЧЭМК были приняты Министерством транспорта США. Через три недели было изменено предписание правительства США по диагностике аварийного нефтепровода в заливе Прудхое в пользу низкочастотных методов.

После одобрения Министерством транспорта США лаборатория НК в Хьюстоне срочно начала работать над многоканальными датчиками, электронной для НЧЭМК и автоматизированного УЗК на этой основе.

В Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины совместно с другими отечественными организациями ведутся работы по применению ЭМАП и НЧЭМК. Технология низкочастотного УЗК протяженных объектов должна найти применение в Украине и России в ближайшие годы, особенно для труднодоступных металлоконструкций.

Альтернативным для многочисленных магнитных методов (магнитографический, магнитопорошковый, феррозондовый и т. п.) является магнитооптическая визуализация (МОВ), основанная на использовании магнитооптического эффекта Фарадея [10]. На рис. 8 показан технологический процесс МОВ магнитограмм (МГ).

В данном случае на поверхность детали накладывается как при магнитографии (рис. 8) магнитная лента. Она является промежуточным носителем информации, содержит следы магнитного поля поверхности детали, которое далее считывается магнитооптическим преобразователем. Промежуточного носителя информации может и не быть, т. е. магнитооптический преобразователь сканирует поверхность объекта контроля. Без промежуточного носителя чувствительность данного метода к трещинам может достигать долей микрона. Пример такой визуализации поверхностных дефектов показан на рис. 9 при использовании в качестве промежуточного носителя информации ленту из никелевого сплава.

На рис. 9 показано визуально-оптическое изображение образца (а), а также его фотографии после капиллярного (б) и магнитопорошкового (в) и МОВ МГ (г).

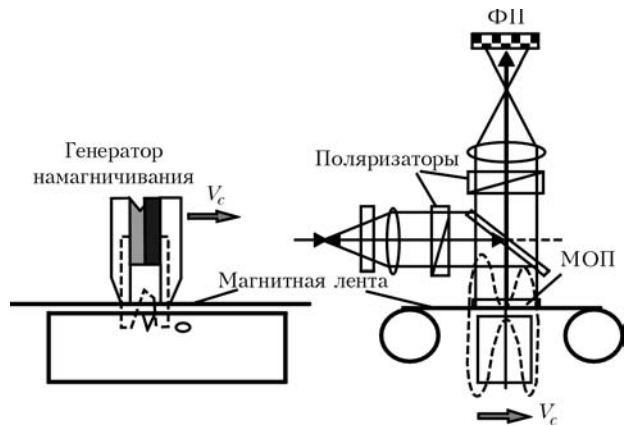


Рис. 8. Схема технологического процесса МОВ МГ

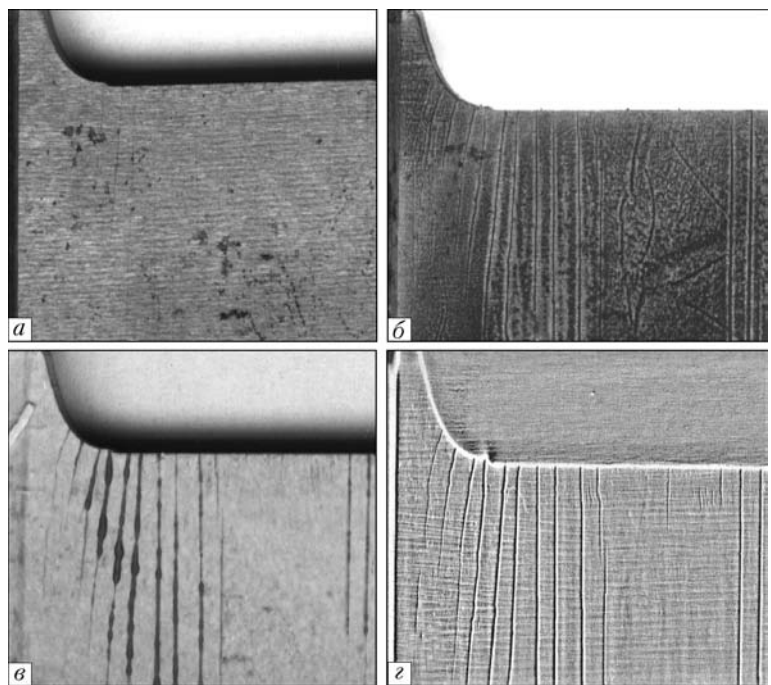


Рис. 9. Поверхностные трещины, выявленные различными методами: а — визуально-оптическим; б — капиллярным; в — магнитопорошковым; г — МОВ МГ



контроля. Как видно из рис. 9, 2, наиболее интересные результаты получены с помощью магнитооптического метода. В этом случае при высокочастотном намагничивании обнаружены дефекты, недоступные магнитопорошковому и капиллярному методам. Кроме того, что этот метод более чувствителен, чем другие методы обнаружения и оценки поверхностных дефектов, он предполагает цифровую обработку изображений [10] со всеми известными ее возможностями.

Таким образом, в области НК непрерывно появляются новые решения. Так, низкочастотный УЗК, теряя информацию о мелких дефектах, позволяет на порядок быстрее и дешевле находить коррозионные поражения глубиной, превышающей более 10 % толщины металла. Для многих протяженных, труднодоступных объектов этого достаточно.

Традиционные методы для исследования качества поверхности (магнитные, вихретоковые, капиллярные, визуальные и т. п.) вытесняются активной термографией, техника которой бурно развивается. Хорошо известны применения термографии для диагностики зданий, сооружений, электротехнических объектов. Практика последних лет показала, что активная термография может существенно дополнить информацию, получаемую традиционными методами контроля качества металлических поверхностей.

Появление высокочувствительных ПЗС-матриц и других совершенных элементов цифровой фотографии позволяет надеяться, что в ближайшие годы аппаратура для рентгенотелевизионного контроля по размерам и стоимости приблизится к аналогичным показателям УЗК. Это обстоятельство увеличит объемы применения НК, а также должно изменить организацию НК. Записываться и архивироваться будут только зоны сварных швов с опасными дефектами, подлежащими ремонту. Остальная часть сварных соеди-

нений будет только просматриваться на наличие внутренних дефектов.

Для оценки качества поверхности ответственных деталей должен найти применение магнитооптический метод, который более нагляден и более чувствителен, чем все другие методы для контроля качества ферромагнитных поверхностей. Пока этот метод НК используется только в криминалистике, например, для восстановления номерных знаков. Сравнительные испытания разными методами одних и тех же поверхностей подтвердили, что наиболее чувствительным является магнитооптический метод.

1. *Троицкий В. А.* Краткое пособие по контролю качества сварных соединений. — Киев: Феникс, 2006. — 320 с.
2. *Shepard M. S.* Developments in Thermographic NDT // NDT Marketplac. — 2008. — № 26.
3. *Review and comparison of shearography and thermography for nondestructive testing / Y. S. Chen, Y. Y. Hung, L. Long, Y. H. Huang // Materials Evaluation. — 2008. — 66, № 10. — С. 1138.*
4. *Рыжиков В. Д., Ополонин О. Д.* Разработка и исследование системы цифрового радиоскопического контроля сварных соединений и металлоконструкций // 36. науч. ст. «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин». — Киев, Изд-ние Ин-та электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, 2006. — С. 90–95.
5. *Troitskij V. A.* Non-destructive testing of multilayer welded structures // Insight. — 1997. — 39, № 9. — С. 646–650.
6. *Троицкий В. А., Бондаренко А. И., Горбик В. М.* Особенности создания и применения намагничивающих устройств на постоянных магнитах для магнитной дефектоскопии // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2007. — № 3.
7. *Nyholt I. I.* Alternative NDT techniques for prudhoe bay pipeline failures // TNT ASNT. — 2007. — 6, № 3.
8. *Троицкий В. А., Бондаренко А. И., Лазебный В. С.* Применение метода низкочастотного УЗК теплообменников // Там же. — 2008. — № 4. — С. 63–70.
9. *Патон Б. Е., Троицкий В. А., Бондаренко А. И.* Метод низкочастотного УЗК протяженных объектов направленными волнами // Там же. — 2008. — № 2. — С. 20–30.
10. *Магнитооптическая дефектоскопия приповерхностных слоев ферромагнитных изделий / Ю. С. Агалиди, С. В. Левый, В. А. Троицкий, Ю. Н. Посыпайко // Там же. — 2007. — № 4. — С. 16–20.*



## РОЗВИТОК ЗАСОБІВ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ І ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ В НАФТОГАЗОВІЙ ГАЛУЗІ

О. М. КАРПАШ, М. О. КАРПАШ, І. В. РИБЦЬКИЙ, Н. Л. ТАЦАКОВИЧ

*Зроблено огляд найновіших досягнень Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу в галузі розробки засобів та технологій технічної діагностики металокопункцій довготривалої експлуатації. Особливу увагу присвячено питанням розроблення та технічної реалізації методів контролю корозійних пошкоджень, оцінки зміни механічних характеристик, а також виявлення та оцінки дефектів типу порушення суцільності.*

*The paper is a review of the most recent achievements of Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas in the field of development of the means and technologies of technical diagnostics of long-term metal structures. Special attention is given to the issues of development and technical implementation of the methods of corrosion damage monitoring, evaluation of the change of mechanical properties, as well as detection and evaluation of discontinuity type defects.*

Нафтогазова галузь України є однією з найстаріших у Європі і включає практично повний перелік можливих секторів — розвідку, буріння, видобування, транспортування та зберігання, а також переробку нафти та газу. Обладнання, що експлуатується у цій галузі, може вважатись таким, що відпрацювало свій нормативний ресурс (майже у 70 % випадків).

Така ситуація зумовлена впливом чинників, котрі можна розділити на дві категорії: технічного та організаційного характеру. До причин технічного характеру слід віднести: високі тиски і температури, агресивні середовища, локальні перевантаження, старіння матеріалу тощо. Організаційні причини в основному пов'язані з фінансовими труднощами, які не дозволяють у повній мірі ремонтувати, обслуговувати та замінити металокопункції, технічний стан яких є незадовільним [1].

Крім того, об'єкти нафтогазової галузі віднесені до категорії потенційно небезпечних і над ними встановлений державний нагляд, який здійснює Держгірпромнагляд МНС України. Зокрема, у 2001 р. прийнято Закон України «Про об'єкти підвищеної небезпеки», який передбачає систематичне виконання процедур із виявлення головних небезпек і оцінку вагомості та ймовірності виникнення цих небезпек на підприємствах, де наявні небезпечні речовини у кількості, що дорівнює або перевищує нормативно-встановлені порогові маси.

Відповідно до існуючої світової та вітчизняної практики, головне місце у виявленні небезпек і оцінці їх вагомості займає технічне діагностування, що в основному реалізується методами неруйнівного контролю (НК) [2].

Так, на сучасному етапі розвитку науки і техніки України ставиться завдання не тільки локалізації та виявлення вже наявних дефектів типу порушення суцільності матеріалу, але й контроль

за утворенням та докритичним розвитком тріщини; контроль напружено-деформованого стану матеріалу; вимірювання зміни фізико-механічних характеристик металу в процесі експлуатації, що дозволить через вимірювання цих параметрів оцінити залишковий ресурс об'єктів довготривалої експлуатації та розробити принципово нові методи, способи і технології оцінки фактичного фізичного (технічного) стану металокопункцій [3].

Для переважної більшості об'єктів нафтогазової галузі можливо застосувати принцип визначення фактичного технічного стану за наступними параметрами:

- геометричні характеристики;
- наявність/відсутність дефектів типу порушення суцільності;
- фізико-механічні характеристики.

Вчені Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу понад 35 років активно працюють за напрямком наукового, технічного, методичного та кадрового забезпечення в нафтогазовій галузі.

Метою даної роботи є висвітлення основних досягнень в галузі НК та технічної діагностики (ТД) в нафтогазовій галузі, визначити перспективи подальшого розвитку вказаного напрямку.

**Визначення геометричних параметрів.** Своєчасне виявлення та правильне визначення фактичних геометричних розмірів (величин зносу) в нафтогазовому обладнанні є однією з вимог забезпечення його безаварійної експлуатації, а прогнозування залишкового ресурсу різних видів обладнання має здійснюватися з дійсної величини зносу та його характеру.

В нафтогазовій галузі найбільше поширення отримали ультразвукові методи контролю цих характеристик. Зокрема, авторами вперше були досліджені способи, розроблені та впроваджені

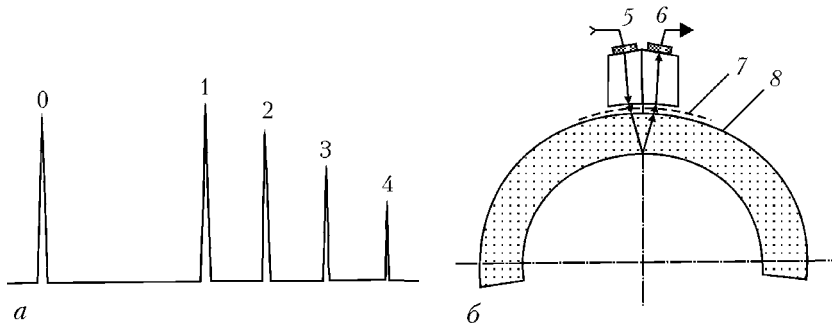


Рис. 1. Зображення багаторазового відбиття УЗ коливань в тілі труби (а) та схема їх проходження (б): 0 — зондуєчий імпульс; 1-4 — імпульси, відбиті від зовнішньої та внутрішньої поверхонь труби; 5 — випромінювач п'єзоелектричний; 6 — приймач п'єзоелектричний; 7 — контактна рідина; 8 — стінка труби

технічні засоби для вимірювання товщини стінки методом безперервного сканування [4]. Такі засоби можуть використовуватися в автоматизованих комплексах НК. Сканування об'єкта контролю може відбуватися або по гвинтовій лінії, або по декількох твірних, використовуючи багатоканальну систему вимірювання. В якості інформативного параметра для оцінки технічного стану труб нафтогазового сортаменту за величиною зношення стінки вибрано екстремальні значення товщини стінки, тобто максимальне і мінімальне її значення в поперечному перерізі труби.

Схема вимірювання товщини стінки труби за вказаним способом наведена на рис. 1. Якщо випромінювач 5 та приймач 6 роздільно-суміщеного перетворювача установлені на невеликій відстані від зовнішньої поверхні контрольованої труби, то на приймальному п'єзоперетворювачі 6, крім зондуєчого імпульсу з індексом 0 і імпульсу з індексом 1, відбитого від зовнішньої поверхні труби, спостерігається серія імпульсів з індексами 2, 3, 4, 5 і т. д., отриманих внаслідок багаторазового відбивання УЗК в стінці труби.

Інтервал часу, який розділяє багатократно відбиті в стінці труби імпульси, а відповідно час зміщення кожного з них відносно імпульсу, відбитого від зовнішньої поверхні стінки труби, змінюється залежно від зміни товщини стінки труби. Тому, вимірюючи інтервал часу  $t$  між сусідніми імпульсами, можна тим самим вимірювати товщину стінки.

Проведені авторами дослідження показали, що найбільш надійним та достовірним є спосіб визначення товщини стінки труб за виміряним часовим інтервалом між імпульсами 1 і 2, відбитими

від зовнішньої та внутрішньої поверхонь стінки, за схемою акустичного тракту з роздільними приймачем та випромінювачем, які конструктивно об'єднані в один роздільно-суміщений п'єзоперетворювач.

При використанні як інформативного параметра часового інтервалу між імпульсами 1 і 2 підвищується точність вимірювання, бо виключається вплив на результат вимірювання величини зазору між випромінюючою

поверхнею п'єзоелектричного перетворювача і зовнішньою поверхнею контрольованої труби. Використання щільного способу створення акустичного контакту виключає прямий контакт перетворювача з об'єктом контролю, що особливо важливо при неперервному автоматизованому вимірюванні.

В останні роки наша увага була прикута до проблеми виявлення та оцінки ступеню корозійного пошкодження трубопроводів нафти та газу. На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень розроблено та впроваджено УЗ корозиметр-товщиномір КТУ-1 (рис. 2), призначений для визначення ступеня корозійного пошкодження поверхні з одночасним вимірюванням залишкової товщини матеріалу виробу як з плоскою, так і з циліндричною поверхнею [5].

В основу роботи приладу покладено принцип вимірювання часу розповсюдження УЗ коливань від перетворювача до поверхні (корозія на зовнішній стороні) і від зовнішньої до внутрішньої поверхні (залишкова товщина стінки) виробу, що контролюється, при русі перетворювача вздовж об'єкта контролю на фіксованому базовому рівні (рис. 3).

Програмне забезпечення приладу КТУ-1 дає змогу проводити контроль виробів в режимі реального часу одночасно з переміщенням перетворювача вздовж поверхні контролю. На екрані комп'ютера відображаються поточні значення ступеня корозійного пошкодження й залишкової товщини стінки (в міліметрах). Таким чином можна отримати зображення перерізу виробу вздовж лінії руху перетворювача.

Прилад оснащено стандартним інтерфейсом RS-232, який дає змогу підключати прилад як до настільного, так і до портативного комп'ютера, що особливо зручно при роботі в цехових або польових умовах, на борту судна або на крилі літака. Вбудована FLASH-пам'ять розширює сферу застосування приладу, оскільки дає можливість зберегти отриманий при контролі переріз виробу й



Рис. 2. Ультразвуковий корозиметр-товщиномір КТУ-1



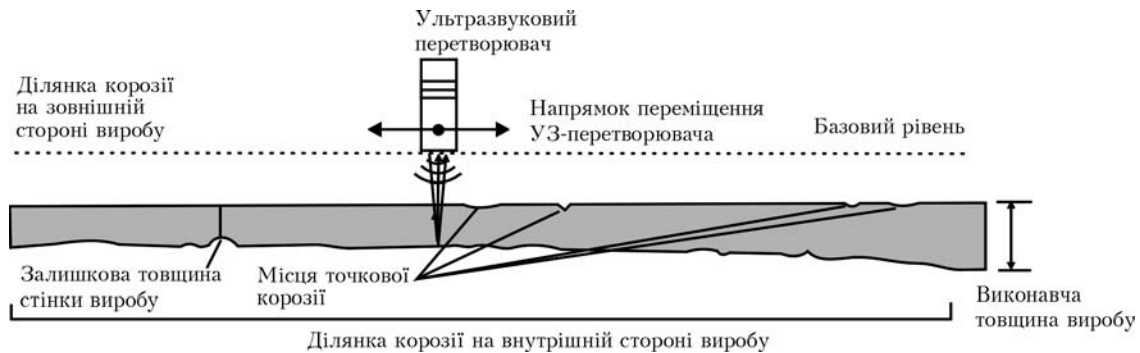


Рис. 3. Схема контролю корозії товщини стінки приладом КТУ-1

передати його на комп'ютер для наступної візуалізації в будь-який зручний для оператора час.

Програмне забезпечення, розраховане на використання в операційних системах Windows 95/98, Windows 2000/XP, що входить в комплект поставки приладу, дозволяє здійснювати зчитування результатів вимірювань з приладу, їх запис на жорсткий диск комп'ютера і підготовку для друку сторінки-звіту за результатами контролю.

**Основні технічні характеристики КТУ-1:** діапазон товщин, що контролюються — 4...30 мм; діапазон вимірювання глибини корозії — 1...10 мм; абсолютна похибка вимірювання товщини — не перевищує  $\pm 0,3$  мм; абсолютна похибка вимірювання глибини корозії —  $\pm 0,1$  мм; максимальна швидкість сканування — до 0,9 м/хв.

Проте необхідність забезпечення якісного акустичного контакту між п'єзоперетворювачем та поверхнею об'єкта контролю за допомогою контактних рідин значно обмежує його застосування.

Принципове вирішення даного завдання було знайдене шляхом використання безконтактного акустичного методу, що базується на використанні повітряного акустичного зв'язку [6].

Дослідно-експериментальна установка, що реалізує даний метод УЗ контролю БКТУ-2 (рис. 4), являє собою ручний переносний прилад у металевому корпусі, до якого приєднуються акустичні перетворювачі та автоматичний сканер. Зв'язок БКТУ-2 з персональним комп'ютером здійснюється через інтерфейс USB.

Для забезпечення достовірності результатів контролю розроблено методику використання дослідно-експериментальної установки в промислових умовах.

Конструктивно УЗ безконтактний перетворювач складається з корпусу 1, демфера 2, корпусу резонатора 3, п'єзоелектричної пластини 4, виготовленої з титанату барію ТБК-3 діаметром 20 мм, резонансна частота якої складає 1 МГц, багатощарового узгоджуючого шару 5 та фіксуючого кільця 6 (рис. 5) [7]. Демпфер, п'єзоелектрична пластина та узгоджуючий шар склеюються за допомогою епоксидної смоли і утворюють резонатор, який кріпиться

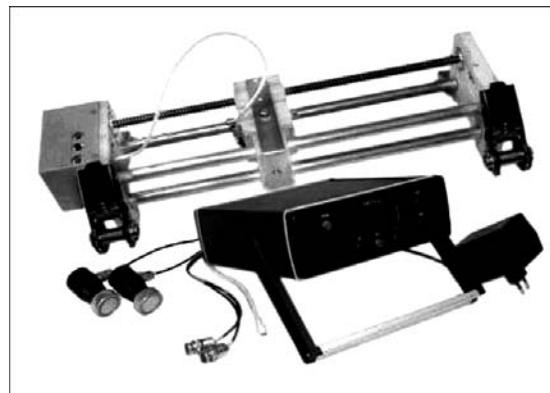


Рис. 4. Дослідна установка БКТУ-2

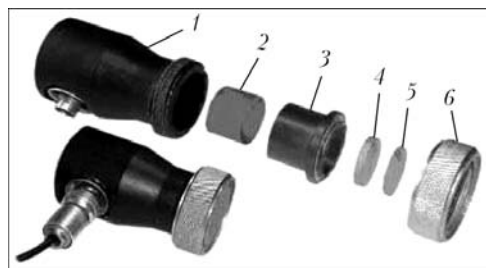


Рис. 5. Конструкція безконтактного УЗ перетворювача (позначення див. у тексті)

ся в корпусі перетворювача за допомогою фіксуючого кільця.

Для проведення експериментальних випробувань було відібрано 12 сталених зразків товщиною від 0,55 до 9,53 мм. Випробування проводили згідно з розробленою методикою. У ході експериментальних досліджень встановлено, що приведена до діапазону (6,57 мм) похибка вимірювань за допомогою удосконаленого безконтактного методу не перевищує 5,5 %.

Промислову апробацію установки було виконано в умовах лабораторій НВФ «Зонд» та промислу Богородчанського ЛВУМГ.

**Виявлення та оцінка дефектів типу порушення суцільності.** Аналіз аварійності трубних колон, що використовуються для буріння та видобування нафти і газу, показав, що, незважаючи на широке впровадження нових типів труб, конструкція різьбових з'єднань яких практично вик-



лючає можливість поломок, а також застосування методів НК для перевірки стану трубних колон, загальна кількість відмов і розподіл відмов за видами за останні десятиліття суттєво не змінилися. Основну частку відмов (до 50 %) складають пошкодження різьбових з'єднань трубних колон (корозійно-утомні руйнування, втрата міцності та герметичності), значна частка відмов (до 30 %) припадає на руйнування труб по гладкій частині (на тілі, зварному шві). Сказане підтверджується такими узагальненими статистичними даними по основних підприємствах галузі (ВАТ «Укрнафта», ДК «Укргазвидобування», ДАК «Чорноморнафтогаз»).

Основну частину відмов складають дефекти типу порушення суцільності матеріалу (тріщини різних видів, непровари, шлакові включення, розшарування тощо).

Було показано, що найбільш ефективним методом виявлення тріщин, у тому числі утомних, у різьбових з'єднаннях труб, що знаходяться у згинченому виді в складі бурильної колони, є акустичний метод [8]. Тому для забезпечення універсальності апаратури та здешевлення її вартості для дефектоскопії нафтогазового обладнання розроблялися переважно способи та засоби акустичного контролю.

Першим етапом у вирішенні поставленої проблеми є розроблення нових та удосконалення існуючих методів математичного моделювання взаємодії зовнішніх фізичних полів з об'єктами контролю для кількості та достовірності діагностичної інформації. Особливо складним об'єктом для дефектоскопічного контролю є трубні вироби та їх різьбові з'єднання, оскільки у них складна геометрична форма, матеріал часто знаходиться під дією значних напружень, а розміри типових дефектів співрозмірні з розмірами витків різьби [9].

Для вирішення такого завдання було розроблено новий підхід до дослідження поширення УЗ коливань у матеріалах, за яким використовується зведення ефективного середовища за модулями пружності, залежними від просторового розподілу попередніх напружень [10].

Вирішення цього питання має суттєве значення для розвитку методів акустичного контролю взагалі, і, зокрема, для однієї з найбільш актуальних проблем — контролю якості різьбових з'єднань труб нафтового сортаменту. Також було досліджено можливість застосування методу променевих рядів Дебая до дослідження поширення, відбиття і заломлення пучків високочастотних хвиль (рис. 6) під час поперечного розповсюдження в циліндричних хвилеводах.

Було одержано аналітичні вирази для знаходження довільної кількості амплітуд  $A_m$ ,  $B_m$  променевих рядів Дебая. Також розглянуті геометрія падаючих, відбитих та заломлених променів на криволінійній межі розподілу двох середовищ і гра-

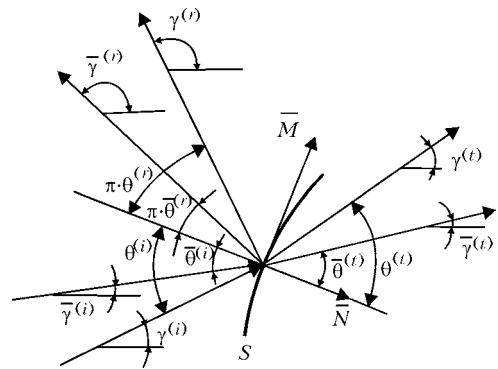


Рис. 6. Схема відбиття та заломлення високочастотних хвиль на криволінійній межі розподілу:  $i, t, r$  — індекси відповідно падаючих, заломлених та відбитих хвиль;  $N, \bar{M}$  — відповідно вектор, нормальний до межі розподілу та дотичний до неї

ничні умови на них, що дало змогу розробити нові способи УЗ контролю трубних виробів [9, 10].

Суттєвим обмеженням застосування акустичного методу контролю є той факт, що внаслідок явища заломлення, відбиття і трансформації ультразвукового контролю (УЗК) на межі розділу середовищ, а також їх розфокусування зовнішньою і внутрішньою поверхнями труби сигнал, що випромінює п'єзоперетворювач, значною мірою (до 98 %) послаблюється. Це призводить до зниження достовірності контролю. Завдання щодо підвищення чутливості контролю може бути вирішено за рахунок збільшення частки ультразвукової енергії, що вводиться в трубний виріб. Одним зі шляхів його вирішення є виконання умови, за якої всі елементарні промені пучка УЗК будуть введені в контрольований виріб по нормалі до його зовнішньої поверхні, тобто будуть відсутні явища відбиття, заломлення і трансформації УЗК.

Була одержана аналітична залежність, що визначає форму випромінюючої поверхні п'єзоперетворювача, за якої всі елементарні промені пучка УЗК будуть введені в контрольований циліндричний виріб по нормалі:

$$R_n = \frac{R_b}{\sqrt{1 + \frac{1}{n^2} - \frac{2}{n} \cos \gamma}}$$

За результатами даних досліджень був теоретично обґрунтований і запатентований спосіб підвищення чутливості УЗ контролю, що забезпечував надійне виявлення тріщин утоми на ранній стадії їх розвитку завдяки збільшенню амплітуди луно-сигналу в 1,9...2,7 рази [11].

На основі проведених досліджень були розроблені унікальні способи та засоби для виявлення дефектів у різьбових з'єднаннях, у тому числі обважених бурильних труб, що дають змогу виявляти корозійно утомні тріщини глибиною від 0,5 мм за умов високих завад (висота профілю різьби 1,8 мм).

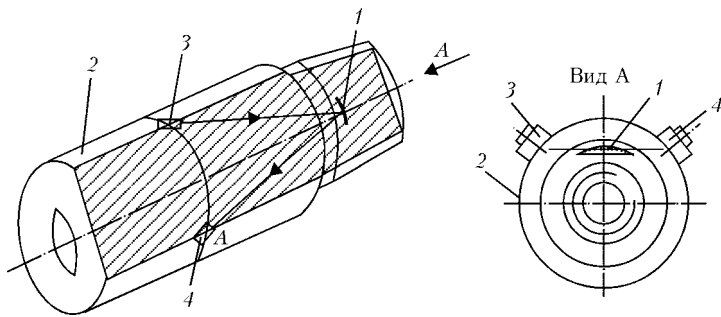


Рис. 7. Схема реалізації способу контролю різьбових з'єднань двома перетворювачами: 1 — дефект; 2 — труба, що піддається контролю; 3, 4 — відповідно випромінюючий та приймаючий п'єзоперетворювачі

Схема реалізації такого способу контролю зображено на рис. 7.

Вказані способи реалізовані в пересувних лабораторіях НК ПЛНК-5, ПЛНК-9, установках «Зонд-5», «Зонд-7», що експлуатуються практично на всіх підприємствах нафтогазової галузі України.

**Визначення фактичних фізико-механічних характеристик металоконструкцій.** У програмі «Ресурс» [3] визначено, що найбільш економічно і технічно прийнятним шляхом виходу з даної ситуації є розроблення нових методів і засобів ТД та НК, за допомогою яких можна буде створити банк даних фізико-механічних характеристик конструкційних матеріалів та їх деградацію з метою оцінки фактичного технічного стану з подальшою оцінкою залишкового ресурсу. Відповідно до чинних нормативних документів найбільш важливими фізико-механічними характеристиками матеріалів металоконструкцій (сталей) є межа плинності, межа міцності, твердість та ударна в'язкість [12].

Для вирішення задачі визначення фізико-механічних характеристик сталей (межа плинності/міцності) раніше було запропоновано використовувати не один параметр, а кілька одразу. В результаті теоретичних досліджень і моделювання були вибрані наступні параметри — твердість, теплопровідність та питомий електричний опір. Останній параметр довелось виключити з переліку в силу неможливості його точного вимірювання в польових умовах для феромагнітних виробів. Теоретичне обґрунтування наявності зв'язку між механічними характеристиками і теплопровідністю було надано в роботах [13, 14]. Для підтвердження проведених теоретичних досліджень та розробленого методу визначення механічних характеристик сталей було розроблено та виготовлено експериментальний взірець приладу ФМХ-1 (рис. 8).

З метою перевірки відповідності приладу ФМХ-1 функціональному призначенню були проведені його лабораторні випробування на зразках насосно-компресорних труб з метою визначення їх границі. Відібрано 13 зразків насосно-компресорних труб із попередньо визначеними в заводських лабораторіях фізико-механічними характе-

ристиками згідно ГОСТ 10006–80. Діапазон вказаних значень межі плинності відібраних зразків 320...760 МПа, товщина стінки усіх зразків 5,5 мм, діаметр 73 мм.

Також в ході попередніх досліджень виділено інформативний параметр, залежність межі плинності зразків від якого описана в роботі [14]. Було показано, що залежність вимірюваної теплопровідності та межі плинності нелінійна. Коефіцієнт кореляції межі плинності  $S$  та інформативного параметру теплопровідності  $M$  дорівнює 0,721, коефіцієнт кореляції твердості та межі плинності 0,857, а залежність між цими параметрами практично лінійна.

При тестуванні приладу ФМХ-1 на двох нових зразках насосно-компресорних труб абсолютна похибка визначення межі плинності склала 11,6 МПа, або приведена до діапазону межі плинності відносна похибка 2,6 % [15].

Невирішеним залишається питання визначення ударної в'язкості неруйнівними методами. Ударна в'язкість характеризує здатність металу труб чинити опір крихкому руйнуванню, а її зміна в процесі експлуатації металоконструкцій підтверджена на практиці [16, 17].

З метою вирішення даного питання були проведені експериментальні дослідження можливості визначення ударної в'язкості неруйнівним методом, а також встановлення характеру залежностей між інформативними параметрами вибраного методу НК та фізико-механічними характеристиками матеріалу трубопроводів, в тому числі реальними значеннями ударної в'язкості, які визначаються стандартними руйнівними методами (ГОСТ 9454–78).

Принцип роботи розробленої експериментальної установки І-1 ґрунтується на встановленій експериментальним шляхом залежності частоти електромагнітних коливань індуктивного контуру перетворювача від фазової структури складу та механічних характеристик матеріалу металокон-

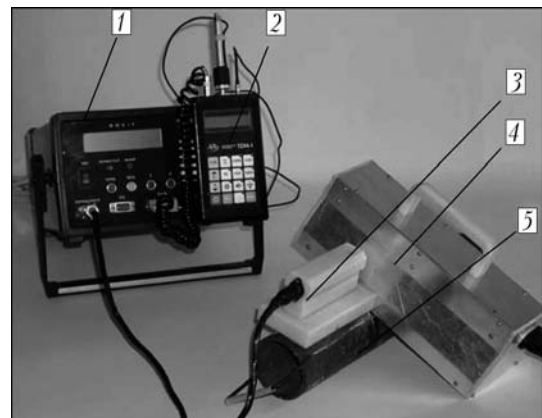


Рис. 8. Комплект установки ФМХ-1: 1 — блок обробки інформації; 2 — твердомір ТДМ-1; 3 — блок термодавачів; 4 — блок нагрівача; 5 — об'єкт контролю (взірець насосно-компресорної труби)

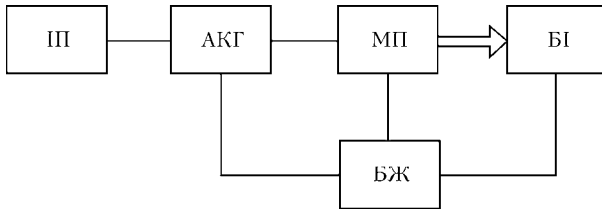


Рис. 9. Блок-схема експериментальної установки І-1: ІІ — індуктивний перетворювач; АКГ — автоколивний генератор; МП — мікропроцесор; БІ — блок індикації; БЖ — блок живлення

струкцій. Блок-схема експериментальної установки зображена на рис. 9 [18].

Було відібрано 18 зразків труб різних марок сталей та визначено їх фактичні фізико-механічні характеристики — твердість і коерцитивну силу, а також проведені вимірювання інформативного параметра *i* за допомогою експериментальної установки І-1.

Використання інформативного параметру, що вимірюється за допомогою розробленої експериментальної установки І-1, у комплексі вхідних параметрів для визначення ударної в'язкості дає високий результат (значення середньої приведеної до діапазону похибки перебуває в межах 3,47...4,11 %). З точки зору найкращого результату і мінімальної кількості технічних засобів оптимальною є комбінація вхідних параметрів твердість — інформативний параметр (середня приведена до діапазону похибка становить 3,90 %).

## Висновки

На вирішення проблеми забезпечення експлуатаційної безпеки в нафтогазовій галузі шляхом НК та ТД було розроблено та технічно реалізовано ряд методів для контролю геометричних параметрів, визначення фізико-механічних характеристик та виявлення дефектів типу порушення суцільності металоконструкцій довготривалої експлуатації.

Подальші зусилля науковців університету зосереджені над вирішенням наступних науково-технічних задач:

розроблення безконтактного УЗ товщиноміра-дефектоскопа з одностороннім доступом до об'єкта контролю;

підвищення інформативності контролю фізико-механічних характеристик шляхом включення нових інформативних параметрів (питомий електричний опір, швидкість поширення ультразвуку);

розроблення методів ідентифікації типів та розмірів дефектів, виявлених УЗ засобами з використанням алгоритмів штучних нейронних мереж;

створення баз даних фактичних фізико-механічних характеристик матеріалу металоконструкцій довготривалої експлуатації.

*Сделан обзор новейших достижений Ивано-Франковского национального технического университета нефти и газа в сфере разработки средств и технологий технической диагностики металлоконструкций длительной эксплуатации. Особое внимание уделено вопросам разработки и технической реализации методом контроля коррозионных повреждений — описан принцип работы экспериментальной установки, реализующей метод бесконтактного ультразвукового контроля. Кроме того, описаны достижения в сфере контроля основных механических свойств (предела текучести/прочности и ударной вязкости) металлоконструкций методами неразрушающего контроля. Проанализированы также достижения в сфере выявления и оценки дефектов типа нарушения сплошности. Дана оценка технического эффекта от внедрения разработанных средств.*

1. Коллакот Р. Диагностика повреждений / Пер. с англ. — М.: Мир, 1989. — 512 с.
2. Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідн. посібник: У 5 т. / Під заг. ред. В. В. Панасюка. — Київ: Наук. думка, 1988. — Т.5: Неруйнівний контроль і технічна діагностика / Під ред. З. Т. Назарчука. — Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2001. — 1134 с.
3. Цільова комплексна програма НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин» («Ресурс»), затверджена Постановою КМ України № 1331 від 08.10.2004.
4. Неруйнівний контроль труб нафтового сортаменту / О. М. Карпаш, Є. І. Крижанівський, П. Я. Криничний та ін. — Івано-Франківськ: Факел, 2001. — 380 с.
5. Карпаш О. М., Зінчак Я. М., Карпаш М. О. Технології та засоби неруйнівного контролю і технічної діагностики нафтогазового обладнання // Нафтова і газова промисловість. — 2007. — № 6. — С. 8–11.
6. Карпаш О. М., Рибіцький І. В., Карпаш М. О. Експериментальна установка для вимірювання товщини металоконструкцій безконтактним акустичним методом // Методи та прилади контролю якості. — 2008. — № 20. — С. 7–12.
7. Карпаш О. М., Рибіцький І. В., Карпаш М. О. Обґрунтування можливості використання кодів Баркера для підвищення чутливості ультразвукового безконтактного способу вимірювання товщини // Техн. діагностика і неразруш. контроль. — 2008. — № 2. — С. 31–35.
8. Неразрушающий контроль и диагностика: Справ. В 2-х кн / В. В. Клюев, Ф. Р. Соснин, В. Н. Филинов и др. // Под ред. В. В. Клюева. — Кн. 2. — М.: Машиностроение, 1995. — 448 с.
9. Про один з підходів до контролю якості скручування різьбових з'єднань у трубах нафтового сортаменту / О. М. Карпаш, Я. М. Бажалук, Я. М. Зінчак та ін. // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. — Львів, 1992. — № 29. — С. 73–77.
10. Карпаш О. М., Рубцов Ю. К. Уточнений анализ отражения пучков высокочастотных упругих волн при поперечном распространении в цилиндрических волноводах // Прикладная механика. — 1994. — № 3. — Т. 30/40. — С. 34–36.
11. А. с. 1783417. Устройство неразрушающего контроля цилиндрических изделий / О. М. Карпаш, Б. И. Ковалив. — 1992. — БИ № 47.
12. Марочник сталей и сплавов / В. Г. Сорокин, А. В. Волосникова, С. А. Вяткин и др. // Под общ. ред. В. Г. Сорокина. — М.: Машиностроение, 1989. — 640 с.





13. *Новий підхід до визначення фізико-механічних параметрів сталей неруйнівними методами / О. М. Карпаш, І. А. Молодецький, І. С. Кісіль, М. О. Карпаш // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. — 2004. — Вип. 9. — С. 80–86.*
14. *Карпаш М. О. Обрунтування комплексного підходу до визначення фізико-механічних характеристик матеріалу металоконструкцій // Методи та прилади контролю якості. — 2004. — № 12. — С. 30–33.*
15. *Кісіль І. С., Карпаш М. О., Ващишак І. Р. Прилад для контролю фізико-механічних характеристик сталей ФМХ-1 // Те саме. — 2005. — № 14. — С. 77–80.*
16. *Эксплуатационная долговечность нефтепроводов / В. В. Курочкин, Н. А. Малюшин, О. А. Степанов, А. А. Мороз. — М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. — 231 с.*
17. *Гумеров А. Г., Гумеров Р. С., Гумеров К. М. Безопасность длительно эксплуатируемых магистральных нефтепроводов. — М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. — 310 с.*
18. *Тацакович Н. Л., Карпаш О. М., Карпаш М. О. Экспериментальне дослідження можливості визначення ударної в'язкості неруйнівним методом // Мат. 14-ї Міжн. наук.-техн. конф. ЛЕОТЕСТ-2009 «Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів». — Славське, 2009. — С. 100.*

Ів.-Франків. нац. техн. ун-т нафти і газу

Надійшла до редакції  
27.05.2009

УДК 620.112.14

## ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ РЕНТГЕНТЕЛЕВИЗИОННЫЕ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ РЕНТГЕНОВСКИХ ЭКРАНОВ И ПЗС-КАМЕР С НАКОПЛЕНИЕМ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В. А. ТРОИЦКИЙ, Н. Г. БЕЛЫЙ, В. Н. БУХЕНСКИЙ, А. В. ЛЕЩИШИН, С. Р. МИХАЙЛОВ, Н. В. СЛОБОДЯН

*Предложена усовершенствованная методика расчета относительной чувствительности контроля рентгенотелевизионных систем на основе рентгеновских экранов и ПЗС-камер, которая учитывает пространственную фильтрацию изображений в системе. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований цифровой рентгенотелевизионной системы на основе рентгеновского монокристаллического экрана CsI(Tl) и ПЗС-камеры, работающей в режиме регулируемой длительности накопления изображений на матрице.*

*The advanced method of calculation relative sensitivity of the testing X-ray television systems on the basis of the X-ray screen and CCD-cameras, which considers a spatial filtration of images in system, is proposed. Results of theoretical and experimental researches for digital X-ray television systems on the basis of the X-ray monocrystal screen CsI(Tl) and the CCD-cameras, operated in a mode of adjustable duration of accumulation of images on a matrix, are given.*

Рентгенотелевизионные системы (РТВС) эффективно применяются для неразрушающего контроля (НК) качества материалов и изделий в промышленности. Такие системы имеют преимущества как перед пленочной, так и перед беспленочной рентгенографией (комплекс «ФОСФОМАТИК») в отношении производительности и стоимости контроля. В отличие от рентгенографии РТВС позволяют также контролировать объекты как в статике, так и в динамике. Наиболее распространены в настоящее время РТВС с промежуточным преобразованием теневого рентгеновского изображения в оптическое с помощью рентгеновских экранов или рентгеновских электронно-оптических преобразователей (РЭОП). РТВС с рентгеновскими экранами имеют ряд преимуществ перед РТВС на основе РЭОП: возможность смены рентгеновского экрана, что позволяет изменять размер рабочего поля и другие параметры РТВС; простота конструкции; низкая стоимость и др. Однако низкая яркость свечения экранов требует применения

в телевизионных камерах таких РТВС высокочувствительных преобразователей свет–сигнал.

Благодаря матрицам на приборах с зарядовой связью (ПЗС-матриц) появилась возможность использовать их в РТВС в качестве преобразователей свет–сигнал. ПЗС-матрицы оказываются более предпочтительными по сравнению с передающими электронно-лучевыми трубками благодаря компактности, минимальным геометрическим искажениям за счет фиксированной геометрии раstra, отсутствию инерционности и большому сроку службы. В последние годы фирмой «Sony» разработана серия ПЗС-матриц, в которой высокая чувствительность, соизмеримая с чувствительностью таких высокочувствительных передающих трубок, как изокон и супервидикон, достигается за счет микролинзового массива на поверхности матрицы (так называемые матрицы EXview HAD CCD). РТВС на основе таких телевизионных ПЗС-камер совместно с рентгеновскими экранами могут эффективно применяться для НК подвижных объектов, обеспечивая относи-



тельную чувствительность контроля 1,7...2,5% в широком диапазоне толщины стали [1].

Дальнейшее улучшение относительной чувствительности контроля РТВС возможно за счет перевода ПЗС-матриц в режим регулируемой длительности накопления изображений. В этом режиме теневого рентгеновского изображение контролируемого объекта преобразуется в оптическое с помощью рентгеновского экрана и накапливается на протяжении определенного времени на ПЗС-матрице телевизионной камеры (накопление происходит за счет прекращения считывания зарядов в элементах матрицы). После окончания накопления изображение считывается из матрицы за один кадр и запоминается в устройстве памяти телевизионной камеры, откуда оно выводится на монитор, а также вводится в компьютер для обработки и архивирования. В связи с этим актуальными являются теоретические и экспериментальные исследования РТВС в режиме регулируемой длительности накопления изображений в ПЗС-камере.

**Теоретические и экспериментальные исследования.** В качестве объекта исследований выбрана разработанная новая цифровая компьютеризированная РТВС на основе монокристаллического рентгеновского экрана из материала CsI(Tl) диаметром 200 мм с телевизионной камерой на матрице EXview HAD CCD фирмы «Sony» типа ICX429ALL формата 1/2" (размер диагонали 8 мм) с количеством активных светочувствительных элементов 752×582 [2]. Камера работает как в вещательном стандарте разложения изображения (625 строк, 25 кадров/с, развертка чересстрочная), так и в режиме регулируемой длительности накопления изображений на ПЗС-матрице (продолжительность накопления до 2048 кадров, длительность кадра 40 мс). Камера оснащена вариообъективом Computar T4Z2813 с относительным отверстием 1:1,3 и фокусным расстоянием 2,8...12 мм. Для переноса изображения с рентгеновского экрана на вход телевизионной камеры используется угловая оптическая приставка с зеркалом.

Изображение контролируемого объекта наблюдается на 17" мониторе типа HITRON HM1723С. Для ввода изображений в компьютер используется высокоскоростное устройство ввода через интерфейс USB 2.0, которое обеспечивает возможность наблюдения и записи изображений на компьютере в реальном времени (частота кадров 50 Гц, формат кадра 720×576). Имеется также возможность записи в компьютер отдельных кадров изображения с высоким разрешением в формате 1440×1152. Управление всеми режимами телевизионной камерой (длительность накопления на ПЗС-матрице, коэффициент усиления видеосигнала, уровень черного и др.) осуществляется с компьютера через интерфейс RS-232.

Для просвечивания контролируемых объектов использовали новый рентгеновский аппарат «ЭКСТРАВОЛЬТ-350» производства ЗАО «ТЕСТ-РОН» (г. Санкт-Петербург, Россия) с двухфокусной металлокерамической рентгеновской трубкой MB 350 фирмы «Tales Electron Devices» (Франция). Для контроля были применены соединенные сваркой стальные пластины толщиной 10, 20 и 30 мм. Измерение относительной чувствительности контроля выполняли с помощью канавочных (Fe-1, Fe-2) и проволочных (Fe-2 и Fe-3) эталонов чувствительности. Стальные пластины с эталонами чувствительности размещали в непосредственной близости у экрана. Расстояние между анодом рентгеновской трубки и экраном составляло 350 мм.

В работе [1] предложена методика теоретического расчета относительной чувствительности контроля РТВС, которая обеспечивает удовлетворительное согласование рассчитанных значений и экспериментальных данных для канавочных эталонов чувствительности. Однако для проволочных эталонов теоретическая чувствительность, рассчитанная по предложенной методике, оказывается несколько выше по сравнению с чувствительностью, измеренной экспериментально. Это объясняется тем, что при расчетах не учитывалась пространственная фильтрация изображений в РТВС, которая оказывает наибольшее влияние на снижение чувствительности именно для проволочных эталонов. Поэтому методика [1] была усовершенствована путем учета пространственно-частотных характеристик (ПЧХ) узлов, входящих в РТВС (рентгеновского экрана, схемы формирования теневого рентгеновского изображения контролируемого объекта, ПЗС-камеры).

Относительная чувствительность контроля РТВС определяет наименьший в направлении просвечивания относительный размер исследуемого объекта, выявляемый данной системой, и определяется для случая использования проволочного эталона по формуле:  $K_d = (d/H_{kz}) \cdot 100\%$ , где  $d$  — наименьший диаметр выявленной проволоки;  $H_{kz}$  — толщина контролируемого объекта.

Как показано в работе [1], дефект может быть с некоторой вероятностью обнаружен, если его яркостный контраст  $k_B$  превышает (в предельном случае равен) пороговому контрасту  $k_{\text{пор}}$ . Поэтому для определения минимального размера дефекта, который может быть обнаружен системой, необходимо построить зависимости яркостного и порогового контрастов от размера дефекта и найти их точку пересечения.

Для определения  $k_B$  и  $k_{\text{пор}}$  использовали следующие формулы:

$$k_B = K_s M(v), \quad (1)$$



$$k_{\text{пор}} = \sqrt{\frac{\Psi_{\text{пор}}^2}{(T_i/T_{EX})(\Omega/A_{CCD})} M^2(\nu) K_N^2 + k_\nu^2}, \quad (2)$$

где  $K_S$  — зарядовый контраст изображения;  $M(\nu)$  — ПЧХ РТВС;  $\nu$  — пространственная частота, которая соответствует поперечным размерам дефекта;  $\Psi_{\text{пор}}$  — пороговое отношение сигнал/шум;  $T$  — время интегрирования зрительным анализатором;  $T_{EX}$  — длительность кадра накопления;  $\Omega$  — площадь дефекта, приведенная к поверхности ПЗС-матрицы;  $A_{CCD}$  — площадь светочувствительного элемента ПЗС-матрицы;  $K_N$  — относительная средняя флуктуация в расчете на площадь светочувствительного элемента ПЗС-матрицы за время накопления;  $k_\nu$  — пороговый контраст зрительного анализатора.

В работе [1] ПЧХ  $M(\nu)$  была принята равной единице, т. е. влияние ПЧХ не учитывалось. Учтем и определим ПЧХ  $M(\nu)$ , которая равна произведению ПЧХ схемы формирования теневого рентгеновского изображения объекта  $M_p(\nu)$ , ПЧХ рентгеновского экрана  $M_{Csl}(\nu)$  и ПЧХ ПЗС-матрицы  $M_{CCD}(\nu)$ .

Для нахождения ПЧХ схемы формирования рентгеновского изображения использовали следующую формулу [3]:

$$M_p(\nu) = \exp(-\pi^2 \nu^2 R_T^2), \quad (3)$$

где  $R_T = \frac{\sqrt{2} f \beta_0}{6}$  — эффективный радиус рентгеновского изображения точечного дефекта, равный расстоянию от центра изображения до точки, в которой интенсивность излучения уменьшается в  $e$  раз;  $f$  — размер фокуса рентгеновской трубки (равный в нашем случае  $f = 3,5$  мм);  $\beta_0 = D/(F - D)$  — коэффициент увеличения фокуса рентгеновской трубки;  $D$  — расстояние между объектом и рентгеновским монокристаллическим экраном, которое принималось равным толщине контролируемого объекта;  $F$  — расстояние между фокусом рентгеновской трубки и рентгеновским монокристаллическим экраном ( $F = 35$  см).

ПЧХ ПЗС-матрицы определяется следующим образом [4]:

$$M_{CCD}(1/n_L) = \{(2n_L/\pi) \sin[\pi/(2n_L)]\}^2 \sqrt{\alpha_1^2 + \beta_1^2/n_L}, \quad (4)$$

где  $\alpha_1$  и  $\beta_1$  рассчитываются по формулам:

$$\alpha_1 = \sum_{m=1}^{2n_L} \cos\{\pi[(2m-1)/(2n_L) + \Delta_0/L_y]\} \cos[\pi(2m-1)/(2n_L)],$$

$$\beta_1 = \sum_{m=1}^{2n_L} \cos\{\pi[(2m-1)/(2n_L) + \Delta_0/L_y]\} \sin[\pi(2m-1)/(2n_L)],$$

где  $n_L$  — количество элементарных ячеек ПЗС-матрицы, которые умещаются на полупериоде  $L_y$  входного светового сигнала;  $m$  — номер элементарной ячейки;  $\Delta_0$  — начальный фазовый сдвиг входного сигнала (в наших расчетах принят равным нулю, так как мы берем худший возможный случай).

При этом, чтобы получить ПЧХ конкретной ПЗС-матрицы аргумент функции  $M_{CCD}$  необходимо умножить на  $L_{py} \delta$  ( $\delta$  — коэффициент уменьшения оптической системы, в нашем случае  $\delta = 30,4$ ). ПЧХ рентгеновского монокристаллического экрана из материала CsI(Tl)  $M_{Csl}(\nu)$  взята из работы [5] и интерполирована кубическими сплайнами.

Перечисленные составляющие ПЧХ, рассчитанные для условий проведенных нами экспериментов, а также результирующая ПЧХ РТВС  $M(\nu) = M_p(\nu) M_{CCD}(L_{py} \delta \nu) M_{Csl}(\nu)$ , приведены на рис. 1.

Для расчета используемых в формулах (1) и (2)  $K_S$  и  $K_N$  использовали математическую модель преобразования сигналов в РТВС на основе рентгеновского экрана и ПЗС-матрицы, подробно описанную в работе [1]. Модель учитывает процесс формирования теневого рентгеновского изображения контролируемого объекта, физические принципы функционирования сцинтилляционных преобразователей излучения и приборов с зарядовой связью. На основе сформированной таким образом модели можно определить количество накопленных в элементарной ячейке ПЗС-матрицы электронов, которое соответствует разностному сигналу от дефекта в просвечиваемом объекте  $Q_s/q$  (полезному сигналу) и количество накопленных электронов, соответствующее фоновому сигналу (сигналу от бездефектного участка)  $Q_\phi/q$ . Затем  $K_S$  и  $K_N$  определяют по формулам:

$$K_S = \frac{(Q_s/q)}{(Q_\phi/q)}, \quad (5)$$

$$K_N = \frac{1}{\sqrt{Q_\phi/q}}. \quad (6)$$

Другие величины, входящие в формулу (2), определены следующим образом. Площадь дефекта, приведенная к поверхности ПЗС-матрицы  $\Omega = d^2/\delta^2$ , где  $d$  — диаметр проволочного эталона. Площадь светочувствительного элемента ПЗС-матрицы ICX-429ALL  $A_{CCD} = L_{py} L_{pz} = 8,6 \times 8,3$  мкм<sup>2</sup>. Длительность одного кадра накопления  $T_{EX} =$

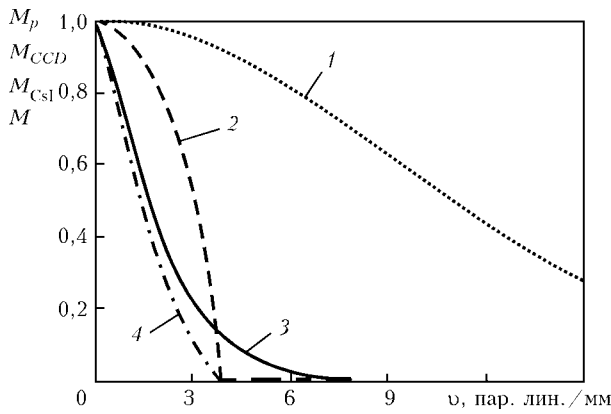


Рис. 1. ПЧХ схемы формирования рентгеновского изображения  $M_p(\nu)$  (1) при  $D = 10$  мм, ПЗС-матрицы  $M_{CCD}(\nu)$  (2), рентгеновского монокристаллического экрана из материала CsI(Tl)  $M_{CsI}(\nu)$  (3) и результирующая ПЧХ РТВС  $M(\nu)$  (4)

= 40 мс. Время интегрирования зрительным анализатором  $T_i = 0,1$  с, пороговый контраст  $k_v = 2\%$ , пороговое отношение сигнал/шум  $\psi_{por} = 3$  [6, 7]. В соответствии с [6] для проволоки проволочного эталона пространственная частота составляет  $\nu = \frac{1}{2,5d}$ .

**Результаты теоретических и экспериментальных исследований.** Теоретический расчет относительной чувствительности проводили для тех же условий (анодный ток и анодное напряжение рентгеновской трубки, другие перечисленные выше параметры), при которых проводили экспериментальные исследования с использованием проволочных эталонов чувствительности.

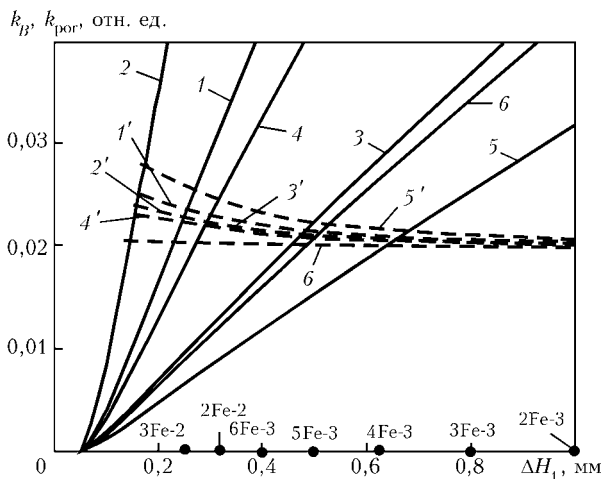


Рис. 2. Зависимости контраста выходного сигнала ПЗС-камеры  $k_B$  (сплошные линии) и порогового контраста  $k_{por}$  (штриховые) от размера дефекта  $\Delta H_1$  для проволочных эталонов Fe-2 и Fe-3: 1 —  $H_{kz} = 10$  мм,  $U_A = 160$  кВ,  $I_A = 10$  мА,  $N_k = 1$ ; 2 —  $H_{kz} = 10$  мм,  $U_A = 100$  кВ,  $I_A = 8$  мА,  $N_k = 64$ ; 3 —  $H_{kz} = 20$  мм,  $U_A = 240$  кВ,  $I_A = 8$  мА,  $N_k = 1$ ; 4 —  $N_{kz} = 20$  мм,  $U_A = 140$  кВ,  $I_A = 10$  мА,  $N_k = 32$ ; 5 —  $N_{kz} = 30$  мм,  $U_A = 260$  кВ,  $I_A = 8$  мА,  $N_k = 1$ ; 6 —  $N_{kz} = 30$  мм,  $U_A = 200$  кВ,  $I_A = 10$  мА,  $N_k = 64$  (характеристики, номер которых помечен штрихом, обозначают соответствующее  $k_{por}$ )

На рис. 2 показаны рассчитанные по описанной методике графики зависимостей контраста выходного сигнала ПЗС-камеры и порогового контраста от размера дефекта (диаметра проволочного эталона). Как видно из рисунка, контраст выходного сигнала ПЗС-камеры практически линейно возрастает с увеличением размера дефекта (диаметра проволоки). При этом угол наклона  $k_B$  тем меньше, чем больше толщина контролируемого образца и чем выше напряжение на аноде трубки. Значение порогового контраста  $k_{por}$  тем выше, чем меньше общее количество квантов, которое создает изображение. Таким образом, видно, что  $k_{por}$  уменьшается при увеличении площади дефекта (диаметра проволоки), а также при увеличении количества кадров накопления. Наблюдаемые закономерности характеристик рис. 2 согласуются с известными принципами формирования рентгеновского изображения [3].

Минимальный размер дефекта, который может быть обнаружен РТВС при конкретных параметрах режима работы, определяется точкой пересечения и соответствующего ему  $k_{por}$ . Расчетное значение относительной чувствительности РТВС определяли по наименьшему диаметру проволочного эталона, для которого выполняется критерий  $k_B \geq k_{por}$  (ближайшее со стороны больших размеров значение диаметра эталона относительно точки пересечения соответствующих кривых на рис. 2).

В таблице приведены результаты экспериментальных исследований относительной чувствительности РТВС при контроле образцов различной толщины  $H_{kz}$  для различных режимов работы системы (анодное напряжение  $U_A$  и анодный ток рентгеновской трубки  $I_A$ , количество кадров накопления ПЗС-камеры  $N_k$ ). Количество кадров накопления  $N_k = 1$  соответствует вещательному стандарту разложения изображения. Результаты измерения относительной чувствительности контроля представлены номерами наименьшей по глубине выявленной канавки и наименьшей по диаметру выявленной проволоки с обозначением типов соответствующих эталонов чувствительности (Fe-1, Fe-2 или Fe-3). Приведены также значения чувствительности контроля по канавочному ( $K_k$ ) и проволочному ( $K_d$ ) эталонам. В последней колонке для проволочных эталонов приведены значения относительной чувствительности РТВС, вычисленные с помощью предложенной методики.

Как видно из таблицы, при работе ПЗС-камеры в вещательном стандарте разложения изображения ( $N_k = 1$ ) относительная чувствительность для толщины  $N_{kz} = 10$  мм составляет  $K_k = 1,67\%$  и  $K_d = 2,5\%$  при  $U_A = 160$  кВ. При уменьшении анодного напряжения до  $U_A = 100$  кВ канавки и проволоки перестают выявляться. Однако накопление на ПЗС-матрице  $N_k = 64$  кадров обеспечи-





Экспериментальные и вычисленные значения относительной чувствительности РТВС

Пункт	$U_A$ , кВ	$I_A$ , мА	$H_{kz}$ , мм	$N_k$	Канавочные эталоны		Проволочные эталоны		
					Номер канавки и тип эталона	$K_k$ , % эксп.	Номер проволоки и тип эталона	$K_d$ , % эксп.	$K_d$ , % выч.
1	160	10	10	1	5Fe-1	1,67	3Fe-2	2,5	2,5
2	100	8	10	64	5Fe-1	1,67	3Fe-2	2,5	2,5
3	240	8	20	1	3Fe-1 6Fe-2	1,80 2,1	4Fe-3	3,15	2,5
4	240	8	20	16	4Fe-1	1,36	5Fe-3	2,5	—
5	140	10	20	32	3Fe-1	1,8	5Fe-3	2,5	1,6
6	260	8	30	1	6Fe-2	1,47	3Fe-3	2,67	2,67
7	260	6	30	16	6Fe-2 2Fe-1	1,47 1,56	4Fe-3	2,1	—
8	200	10	30	64	3Fe-1	1,25	5Fe-3	1,67	1,67

вает ту же чувствительность, что и при  $U_A = 160$  кВ. Изображения, полученные после накопления, являются более качественными из-за отсутствия на них шумов. На рис. 3 приведено изображение сварного соединения, полученного после накопления в ПЗС-камере  $N_k = 64$  (режимы соответствуют п. 2 таблицы).

Наилучшая относительная чувствительность контроля для толщины стали  $H_{kz} = 20$  мм, достигнутая в вешательном стандарте разложения, составила  $K_k = 1,8$  % и  $K_d = 3,15$  % при  $U_A = 240$  кВ (п. 3 таблицы). Накопление  $N_k = 16$  при том же анодном напряжении улучшает чувствительности контроля  $K_k$  с 1,8 до 1,36 % и  $K_d$  с 3,15 до 2,5 %. Снижение анодного напряжения до  $U_A = 140$  кВ в вешательном стандарте разложения приводит к резкому ухудшению чувствительности (канавки и проволоки эталонов практически не выявляются). Однако накопление на ПЗС-матрице  $N_k = 32$  кадров обеспечивает такую же чувствительность  $K_k$ , как при  $U_A = 240$  кВ, а также улучшает чувствительность контроля  $K_d$  до 2,5 % по сравнению с  $U_A = 240$  кВ. Соответствующее изображение сварного соединения приведено на рис. 4 (п. 5 таблицы).

Аналогичная закономерность наблюдается также для толщины  $H_{kz} = 30$  мм. Чувствительность контроля, достигнутая в вешательном стан-

дарте разложения, составила  $K_k = 1,47$  % и  $K_d = 2,67$  % при  $U_A = 260$  кВ. Накопление на ПЗС-матрице  $N_k = 16$  кадров улучшает чувствительность  $K_d$  с 2,67 до 2,1 %. А при снижении анодного напряжения до  $U_A = 200$  кВ накопление  $N_k = 64$  кадров позволяет достичь чувствительности контроля  $K_k = 1,25$  % и  $K_d = 1,67$  % (п. 8 таблицы), что превосходит чувствительность, полученную при анодном напряжении  $U_A = 260$  кВ.

Из таблицы видно, что расчетные оценки согласуются с экспериментальными данными значительно лучше, чем в работе [1], где не учитывалась пространственная фильтрация. В работе [1] для проволочных эталонов наблюдалось только одно совпадение из шести экспериментов с двумя камерами, а усовершенствованная методика расчета относительной чувствительности дала четыре совпадения в шести случаях.

Перевод ПЗС-камер РТВС в режим регулируемой длительности накопления изображений позволяет также эффективно применять малогабаритные импульсные рентгеновские аппараты и проводить контроль в полевых условиях и труднодоступных местах. Так, при работе РТВС с импульсным аппаратом МИРА-2Д была достигнута чувствительность контроля 2,5 % при просвечивании стали толщиной 10 мм и накоплении на ПЗС-матрице 256 кадров.

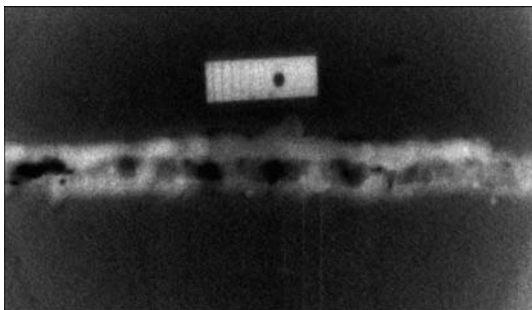


Рис. 3. Изображение сварного соединения (режимы соответствуют п. 2 таблицы)

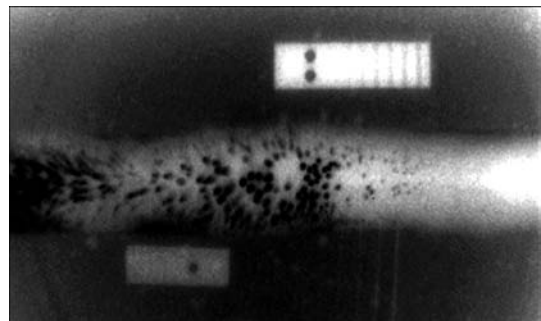


Рис. 4. Изображение сварного соединения (режимы соответствуют п. 5 таблицы)

**Выводы**

Предложенная усовершенствованная методика расчета относительной чувствительности рентгенотелевизионных систем учитывает процесс формирования теневого рентгеновского изображения контролируемого объекта, физические принципы функционирования сцинтилляционных преобразователей излучения и приборов с зарядовой связью, пространственную фильтрацию изображений в системе и позволяет с достаточной точностью оценивать характеристики создаваемых рентгенотелевизионных систем на основе рентгеновских экранов и ПЗС-камер.

Перевод ПЗС-камер в режим регулируемой длительности накопления изображений позволяет улучшить относительную чувствительность РТВС, повысить качество получаемых изображений за счет устранения шумов и существенно снизить необходимую мощность экспозиционной дозы рентгеновского излучения на ее входе.

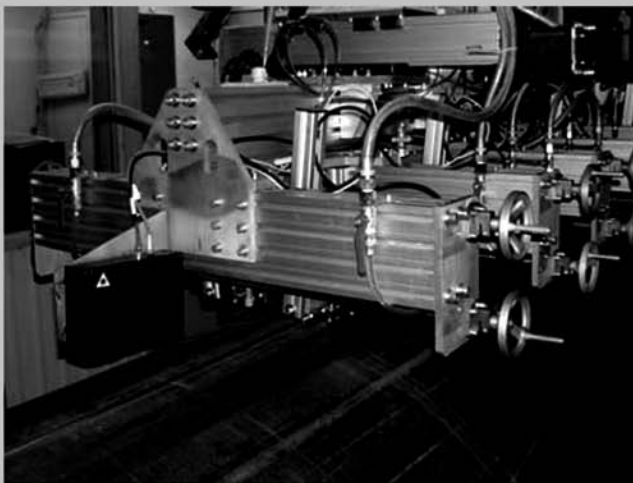
Применение режима регулируемой длительности накопления изображений в ПЗС-камерах позволяет проводить контроль в полевых условиях и

труднодоступных местах с использованием малогабаритных импульсных рентгеновских аппаратов.

1. *Относительная чувствительность рентгенотелевизионных систем на основе высокочувствительных ПЗС-камер и рентгеновских монокристаллических экранов* / Н. Г. Бельский, С. В. Денбовецкий, А. В. Лецишин и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2007. — № 2. — С. 34–40.
2. *Diagonal 8 mm (Type 1/2) CCD Image Sensor for CCIR V/W Video Cameras ICX429ALL* // www.sony.net.
3. *Михайлов С. П.* Моделирование теневого рентгеновского изображения контролируемого объекта в рентгеноскопических системах неразрушающего контроля // Электроника и связь. — 2002. — № 16. — С. 59–70.
4. *Носов Ю. Р., Шилин В. А.* Основы физики приборов с зарядовой связью. — М.: Наука, 1986. — 320 с.
5. *X-ray image intensifiers* // www.hpk.co.jp/hp2e/products/Etd/X-IE.htm.
6. *Гурвич А. М.* Физические основы радиационного контроля и диагностики. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 168 с.
7. *Роуз А.* Зрение человека и электронное зрение / Пер. с англ. — М.: Мир, 1977. — 216 с.
8. *Краткое пособие по контролю качества сварных соединений.* — Киев, Феникс, 2006. — 316 с.
9. *Пособие по радиографии сварных соединений.* — Киев: Феникс, 2008. — 312 с.

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

*Поступила в редакцию  
25.05.2009*

**СИСТЕМА СЛЕЖЕНИЯ ЗА ШВОМ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ УЛЬТРАЗВУКОВОМ  
КОНТРОЛЕ СВАРНЫХ ТРУБ**

Основная задача системы - автоматическая коррекция положения ультразвуковых датчиков относительно шва в процессе контроля. Точность слежения за швом составляет  $\pm 0.5$  мм при скорости ультразвукового контроля до 30 м/мин. Система слежения используется в составе установки АУЗК НК-360 (НК-361) на предприятии ОАО «Выксунский металлургический завод» (Россия, 2005 г.).

ИЭС им. Е.О.Патона, 03680, г. Киев, ул. Боженко, 11, Тел./факс (044) 287-67-11, 271-25-05, E-mail: eshapovalov@paton.kiev.ua.



## ПРОМЫШЛЕННАЯ ТОМОГРАФИЯ ИЗ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕНТГЕНОВСКИХ ПРОЕКЦИОННЫХ ДАННЫХ

С. Л. ЗОЛОТАРЕВ, В. Л. ВЕНГРИНОВИЧ

*Традиционная томография является эффективным средством для медицинской диагностики, неразрушающего контроля промышленных конструкций и проверки качества индустриальных изделий. Задача томографической реконструкции изображений объектов в случае ограниченного угла обзора, малого количества проекций и/или недостаточной мощности рентгеновского источника излучения является некорректной обратной задачей. Статья посвящена случаю, когда закон линейного ослабления не выполняется для некоторых направлений просвечивания и, более того, эффект ужесточения лучей приводит к погрешностям в реконструкции.*

*Traditional tomography is an effective means for medical diagnostics, non-destructive testing of industrial structures and checking the quality of industrial products. The problem of tomographic reconstruction of object images in the case of a limited viewing angle, small number of projections and/or insufficient power of X-ray radiation source is an incorrect inverse problem. The paper is devoted to the case, when the linear weakening law is not fulfilled for some directions of transmission and moreover, the effect of increased rigidity of the beams leads to reconstruction errors.*

Томографическая визуализация (ТВ) — это технология математической реконструкции свойств и изображений объектов по многосенсорным данным с помощью тепловых, электромагнитных, акустических, рентгеновских, оптических и других измерительных систем. Она является важным средством для создания интегрированной информационной среды, а именно, для получения трехмерных цифровых компьютерных изображений производственных изделий и процессов.

Если при ТВ «наблюдение» объекта доступно из любого положения на круговой траектории, то для получения качественного трехмерного изображения объекта используется либо алгоритм, основанный на преобразовании Радона, либо итерационный метод реконструкции, либо метод фильтрованных обратных проекций (ФОП). Однако в случае наличия ограниченных углов обзора и/или малого количества проекций, задача становится сильно некорректной [1–6].

Если, например, рентгеновское излучение не может полностью просветить объект контроля по наилучшим направлениям, то его нельзя реконструировать с помощью традиционных итерационных алгоритмов [7]. Иногда удовлетворительной реконструкции можно добиться, применяя байесовскую реконструкцию изображений с использованием приемлемой априорной информации, признанной наиболее эффективной для реконструкции изображений из неполных наборов данных [6–8]. Использование в качестве априорной информации статистических свойств восстанавливаемого изображения также является весьма полезным для бинарных изображений [9–12].

В последнее время быстрыми темпами развивается промышленная рентгеновская томография, которая позволила вывести, например, контроль фасонных отливок различных деталей автомобильных и тракторных двигателей на качественно новый уровень. Производство ответственных изделий современного машиностроения — автомобильных, тракторных и авиационных двигателей, охлаждаемых турбинных лопаток невозможно без использования современных средств измерения линейных размеров. Однако традиционные средства измерения, незаменимые при оценке характеристик отдельных деталей и образцов простейшей формы, неприменимы при измерениях внутри сложных пространственно разветвленных деталей и сборных либо неразборных соединений. Понятно, что штангенциркулем невозможно измерить толщину стенки охлаждаемой турбинной лопатки сложной формы, также как, например, и зазор внутри неразборного клапана. Такие задачи решаются с помощью промышленной рентгеновской томографии, способной без геометрических искажений и с высокой степенью точности бесконтактно измерить размеры указанных выше структурных элементов внутри изделий любой сложности. С ее помощью достижима уникально высокая точность бесконтактного неразрушающего измерения размеров внутренних структурных элементов и их локальных дефектов, соизмеримая с точностью традиционных средств контактного измерения наружных размеров промышленных изделий. Основные ограничения информационных характеристик и возможных областей применения современных промышленных



томографических систем обусловлены несовершенством источников рентгеновского излучения — слишком низкой для машиностроительных задач величиной энергии, слишком большими размерами фокусных пятен и ничтожной удельной интенсивностью в пересчете на размеры фокусного пятна.

Все это вызывает необходимость развития новых направлений исследований, направленных на создание концепции, теории, алгоритмов и соответствующего программного обеспечения для преодоления дефицита исходных данных в задачах неразрушающего контроля (НК) с помощью новых эффективных математических и алгоритмических средств. На сегодня нужно уметь осуществлять реконструкцию с ограниченного количества направлений просвечивания, расположенных в угловом диапазоне меньше, чем  $180^\circ$ , а также в условиях применения минифокусных рентгеновских трубок с небольшими напряжениями. Снижением энергии просвечивания можно одновременно повысить разрешение, так как при этом соответственно уменьшится и размер фокусного пятна. Актуальным является вопрос разработки эффективных вычислительных технологий, которые позволили бы осуществлять высокоточную реконструкцию сложных машиностроительных деталей, например, головок блока цилиндров дизельных двигателей, при отсутствии полной информации по некоторым направлениям просвечивания. Следует также заметить, что одним из самых массовых объектов томографического контроля в авиационной промышленности и очень важным для надежности авиадвигателей являются охлаждаемые турбинные лопатки, неразрушающее измерение внутренней геометрии которых невозможно без ТВ.

**Двухмерная итерационная реконструкция турбинных лопаток.** При традиционном томографическом контроле подобных объектов контроля из-за резкого изменения толщины в зависимости от направления просвечивания общие требования к энергии излучения ориентируются на худшие направления, отказавшись от которых можно было бы достичь существенного улучшения, перейдя в область более низких энергий, где имеются минифокусные трубки. Типичные задачи технологического контроля лопаток — локальные измерения размеров стенок в местах утонений, обнаружение рыхлот, пор и трещин. На рис. 1, *а* показана современная охлаждаемая лопатка с простейшей внутренней структурой, изготовленная из никелевого сплава (худшее направление в месте контроля — ширина пера порядка 35 мм; лучшее направление — поперек стенки с суммарной толщиной порядка 4 мм),

на рис. 1, *б* — обработанные линейные проекции одного из поперечных сечений данной лопатки для энергии источника 125 кВ, которые содержат  $1024 \times 480$  16-разрядных значений.

Интервал между 1024 значениями в каждой одноракурсной проекции равен 0,04 мм, угловой шаг между ракурсами  $0,375^\circ$ . Рентгеновскую съемку проводили при напряжении рентгеновской трубки 125 кВ, причем, рассеянное излучение ослаблено удаленностью от детекторов и коллимацией. Всего здесь содержится 480 проекций. Проблема заключается в том, что для того, чтобы полностью просветить данный объект контроля во всех направлениях, необходимо напряжение рентгеновской трубки 420 кВ. При таком напряжении поперечное сечение лопатки реконструируется с пространственным разрешением, достаточным для оценки необходимых технологических размеров и обнаружения дефектов сплошности и рыхлот, которые могут присутствовать в изделии. Однако при этом приходится использовать дорогостоящее рентгеновское оборудование и поскольку размер фокусного пятна для данного напряжения является достаточно большим, то существуют принципиальные ограничения для повышения пространственного разрешения для особо тонких стенок, т. е. внутренняя конфигурация лопатки может быть существенно более сложной. Для уменьшения размера фокусного пятна желательно было бы перейти к напряжению рентгеновской трубки 125 кВ, однако из-за невозможности полностью просветить лопатку в наиболее протяженных направлениях, получается реконструкция, осуществленная ФОР.

С целью улучшения последней реконструкции была проведена коррекция экспериментальных данных. Для коррекции реальных проекций использовали алгоритм, учитывающий эффект ужесточения лучей, характерный для просвечивания протяженных объектов полихроматическим рентгеновским излучением. Закон ужесточения рентгеновских лучей был определен по экспериментальным данным, полученным при просвечивании реальной лопатки известной конфигурации для напряжения рентгеновской трубки 125 кВ и модельным проекциям, полученным для САД пред-

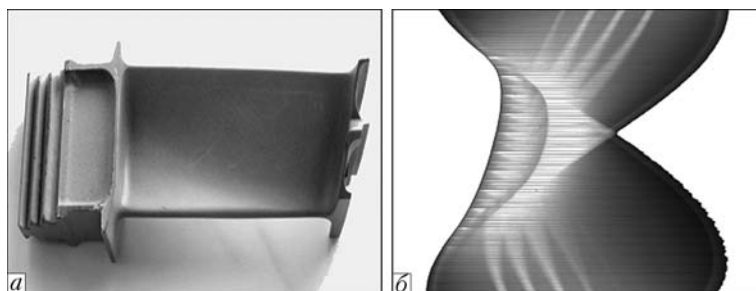


Рис. 1. Современная турбинная лопатка (*а*) и линейные проекции одного из ее поперечных сечений (*б*)

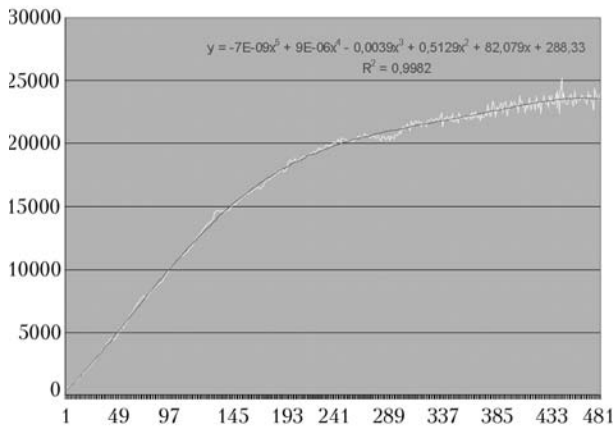


Рис. 2. Зависимость суммарной толщины лопатки на лучевых срезах от соответствующих показаний детекторов

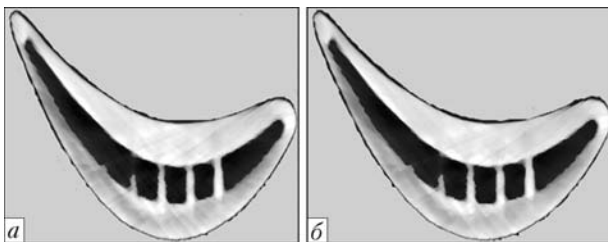


Рис. 3. Результаты итерационной реконструкции лопатки после 16 (а) и 20 итераций (б)

ставления данной лопатки, совмещенного в пространстве с реальным изделием. На рис. 2 показан график аппроксимации зависимости суммарной толщины лопатки на лучевых срезах от соответствующих показаний детекторов полиномом пятой степени.

Используя методику, основанную на предварительной коррекции реальных проекционных данных по данной зависимости, с целью устранения эффекта ужесточения лучей, была проведена итерационная байесовская реконструкция [6] по 240 проекциям. На рис. 3 показаны результаты итерационной байесовской реконструкции после 16 и 20 итераций соответственно. Полученное пространственное разрешение уже достаточно близко к тому, которое необходимо иметь по техническим условиям и, конечно, существенно лучше того, которое было получено с использованием стандартного алгоритма.

**Трехмерная реконструкция промышленных объектов.** С целью исследования возможности создания на территории Беларуси промышленных томографов на основе уже выпускаемого серийно рентгеновского оборудования фирмы «Адани» [13], было проведено рентгеновское сканирование вентилятора и масляного распределителя на рентгеновской установке фирмы «Адани» Securescan с неподвижным Г-образным детектором с 3136 регистрирующими элементами размером 0,8 мм (детали перемещались относительно планки детекторов на подвижной платформе). Рассто-

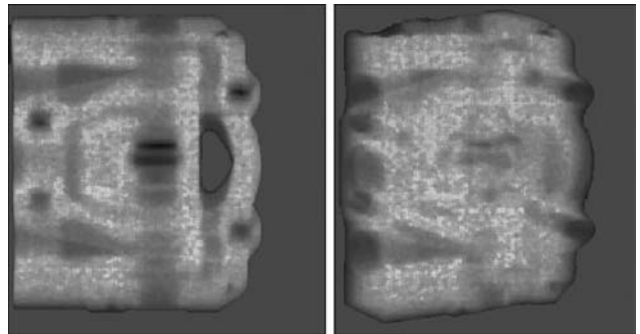


Рис. 4. Проекция масляного распределителя для 0 и 30°



Рис. 5. Сечения трехмерного изображения масляного распределителя координатными плоскостями XOY и XOZ

яние от рентгеновского источника до детектора 1799 мм, рабочее напряжение трубки 160 кВ, размер фокусного пятна 0,8 мм. Было получено 60 цифровых рентгеновских снимков вентилятора размером 1150×3136 с разрешением 0,6×0,8 мм в угловом диапазоне 180° с шагом 3° и 60 таких же рентгеновских снимков для масляного распределителя.

Особый интерес представляет реконструкция масляного распределителя. Габаритные размеры масляного распределителя 134×90×45 мм, а для напряжения 120 кВ, при котором проводили рентгеновскую съемку, можно просветить слой стали порядка 40 мм, т. е. на большинстве рентгеновских проекций очень значительны потери информации, однако, благодаря коррекции эффекта ужесточения лучей и учета дополнительной априорной информации о реальном значении коэффициента линейного ослабления стали для данной энергии просвечивания, удалось в принципе восстановить внутреннюю структуру масляных каналов. На рис. 4 показаны проекции для углов 0 и 30°. Хорошо видно насколько сильно зашумлены и как быстро деградируют проекционные изображения в зависимости от углового положения рентгеновского источника по отношению к масляному распределителю.

На рис. 5 приведены сечения реконструированного трехмерного изображения масляного распределителя координатными плоскостями XOY, YOZ и XOZ.





## Выводы

Способ компенсации неполноты исходных данных на основе осуществления коррекции ужесточения рентгеновского излучения по имеющимся реальным проекциям и проекциям, полученным для известного САД представления этого же объекта контроля, показал хорошую эффективность при использовании байесовских реконструктивных алгоритмов. Дальнейшее развитие и усовершенствование данной технологии должно позволить существенно повысить эффективность томографического контроля промышленных изделий.

Авторы выражают глубокую благодарность проф. В. Н. Линеvu за помощь в организации рентгеновского сканирования промышленных изделий.

1. *X-ray 3D reconstruction using minimal projections and maximum a priori knowledge* / V. L. Vengrinovich, Yu. B. Denkevich, G.-R. Tillack, S. Heine // Proc. Intern. conf. «Computer methods and Inverse Problems in nondestructive Testing and Diagnostics», 21–24 Nov. — Minsk, 1995. — P. 77–82.
2. *X-ray 3D reconstruction of objects with unhomogeneous internal structure using a priori knowledge* / V. L. Vengrinovich, S. A. Zolotarev, G.-R. Tillack, C. Nockemann // Ibid. — P. 124–128.
3. *Multistep 3D X-ray tomography from a limited number of projections and views* / V. L. Vengrinovich, Yu. Denkevich, G.-R. Tillack, C. Nockeman // Review of Progress in QNDE, ed. by D. O. Tompson and D. E. Chimenti, Plenum Press. — New York, 1997. — 16. — P. 317–323.
4. *Золотарев С. А., Венгринович В. Л.* Трехмерная реконструкция по минимальному числу проекций с внутриитерационным подавлением теневых артефактов // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1998. — № 2. — С. 32–38.
5. *Reconstruction of Three-Dimensional Binary Structures from Extremely Limited Number of Cone-Beam X-ray Projections. Choise of Prior.* / V. L. Vengrinovich, Yu. Denkevich, G.-R. Tillack // J. of Phys., D:Applied Physics. — 1999. — 32. — P. 2505–2514.
6. *Vengrinovich V. L., Denkevich Yu., Tillack G.-R.* Bayesian 3D X-ray reconstruction from incomplete noisy data // Maximum Entropy and Bayesian Methods, ed. by W.von der Linden et. al., Kluwer Academic Publishers. — 1999. — P. 73–83.
7. *Vengrinovich V. L., Denkevich Yu., Tillack G.-R.* Limited projection 3D X-ray tomography using the maximum entropy method // Review of Progress in QNDE, ed. by D. O. Tompson and D. E. Chimenti. Plenum Press. — New York, 1998. — 17. — P. 403–410.
8. *Bayesian Restoration of Crack Images in Welds from Incomplete Noisy Data* / V. L. Vengrinovich, Yu. Denkevich, G.-R. Tillack et al. // Review of Progress in QNDE, ed. By D. O. Tompson and D. E. Chimenti, American Institute of Physics. — Melville-New York, 2000. — 19A. — P. 635–642.
9. *Золотарев С. А., Венгринович В.Л., Тиллак Г. Р.* 3-хмерная реконструкция внутренней поверхности двухсвязного бинарного объекта по малому числу проекций // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — Киев, 2001. — № 2. — С. 8–11.
10. *Трехмерная томографическая визуализация труб в процессе эксплуатации* / В. Л. Венгринович, С. А. Золотарев, Ю. Б. Денкевич, Г.-Р. Тиллак // 4-я Нац. науч.-техн. конф. «Неразрушающий контроль и техническая диагностика». — Киев, 2003. — С. 46–50.
11. *New technique for 2D an 3D X-ray image restoration of pipes in service given a limited access for observation* / V. L. Vengrinovich, S. A. Zolotarev, A. Kuntsevich, G. R. Tillack // Review of Progress in QNDE, ed. By D. O. Thompson and D. E. Chimenti, Plenum Press New-York. — New-York, 2001. — 20A. — P. 756–763.
12. *Zolotarev S. A., Vengrinovich V. L., Tillack G.-R.* 3D Reconstruction of Flaw Images with Inter-Iterational Suppression of Shadow Artefacts // Review of Progress in QNDE, ed. By D. O. Thompson and D. E. Chimenti, Plenum Press New-York. — New-York, 1997. — 16. — P. 216–221.
13. *Линев В. Н.* Роль современных сканирующих технологий в цифровой рентгенодиагностике // Сб. матер. Междунар. междуниверситетского семинара по диагностической и терапевтической радиологии «Радиология в медицинской диагностике». — Минск, 2003. — С. 41–49.

Гос. науч. уч-ние «Ин-т прикладной физики», НАН Беларуси, Минск

Поступила в редакцию  
29.11.2008

### СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ВАЛИКА УСИЛЕНИЯ СВАРНОГО ШВА И УПРАВЛЕНИЯ ДОЗАТОРОМ ПОЛИМЕРА ПРИ НАНЕСЕНИИ АНТИКОРРОЗИЙНОГО ПОКРЫТИЯ НА ПОВЕРХНОСТЬ СВАРНЫХ ТРУБ



Система предназначена для обнаружения центра валика усиления шва при вращении трубы и формирования сигналов управления дозировкой полимера для обеспечения однородной толщины полимерного покрытия на готовой трубе (увеличение дозировки в момент нанесения полимера на валик). Система внедрена в производство на предприятии ОАО «Харцызский трубный завод» (Украина, 2008 г.).

ИЭС им. Е.О.Патона, 03680, г. Киев, ул. Боженко, 11, Тел./факс (044) 287-67-11, 271-25-05, E-mail: eshapovalov@paton.kiev.ua.



# ВИМІРЮВАННЯ ФАЗОВОЇ ШВИДКОСТІ УЛЬТРАЗВУКУ ЯК СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНЬ ТА УТОМИ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

С. М. МАЄВСЬКИЙ

*Матеріал статті направлений на вирішення проблеми оцінки механічних напружень і степені втоми матеріалів шляхом високоточного з похибкою не гірше 0,01 % вимірювання фазової швидкості розповсюдження ультразвукового сигналу. Описано метод визначення часового запізнення ультразвукового сигналу та довжини шляху його розповсюдження шляхом вимірювання кумулятивних фазових зсувів ультразвукових сигналів, що розповсюджуються за двома близько розташованими траєкторіями.*

*This article is direct to evaluation of mechanical stress and fatigue of materials by ultrasonic phase velocity precise (0,01 %) measurement. Determination of ultrasonic time delay and length propagation by measurement of cumulative phase sheeft of two ultrasonic near propagated signals is described.*

Вимірювання фазової швидкості (далі просто швидкості) УЗ коливань у різноманітних середовищах від газів, рідин до твердих тіл знаходить широке застосування у техніці та наукових дослідженнях. Особливо велика перспектива використання методу вимірювання швидкості УЗ коливань лежить у плані дослідження стану твердих матеріалів і перш за все сталей, вироби з яких використовуються у силових конструкціях. Вимірюючи УЗ швидкість, можемо вирішити одну з найбільш актуальних проблем сучасного НК: визначати степені механічних напружень матеріалу конструкцій та оцінювати запас їхньої міцності. Але при цьому вимоги до точності вимірювання швидкості різко зростають. Як показує світовий досвід [1–4], точність вимірювання швидкості розповсюдження УЗ коливань повинна бути не меншою за  $10^{-2}$  %.

Швидкість розповсюдження коливань є результат ділення довжини шляху, пройденого коливанням, на часову затримку коливань на цьому шляху. В численних, присвячених даній проблемі, роботах увага приділяється лише питанню точності вимірювання часової затримки. Вважається, що довжина шляху розповсюдження коливань має бути попередньо виміряна, наприклад, засобами лінійних вимірювань. Проте подібні вимірювання можна виконати лише в лабораторії для зразків матеріалу і практично неможливо це зробити на реальних конструкціях, що знаходяться у стані експлуатації.

В даній роботі питання прецизійного вимірювання швидкості розповсюдження УЗ коливань розглядається комплексно від вимірювання часових затримок коливань до визначення довжини шляху розповсюдження ультразвуку перш за все для випадків, коли неможливо використати мето-

ди та засоби лінійних вимірювань. При цьому в основі пропонованого автором методу вимірювання шляху, пройденого УЗ коливаннями, теж використовується прецизійно визначена затримка цих коливань.

**Прецизійне вимірювання затримки УЗ коливань на основі когерентних перетворень сигналів.** Розглянемо, яким чином забезпечити вимірювання часової затримки УЗ коливань з зазначеною вище точністю. Зрозуміло, що традиційний метод вимірювання часової затримки збудженого п'єзоперетворювачем швидкозатухаючого радіоімпульсного УЗ коливання шляхом кодування імпульсу, обмеженого моментом збудження радіоімпульсу та моментом його приходу до п'єзоелектричного чи іншого перетворювача як приймача коливань, високої точності не забезпечить. Поріг нечутливості компаратора напруги (це основний засіб визначення моменту появи напруги на виході електричного тракту приймача коливань) та вплив адитивних завод обмежують точність подібного методу вимірювання затримки похибкою, що сягає 0,1%.

Найбільшу потенційну точність вимірювання часової затримки забезпечує фазовий метод завдяки пропорційності фазового зсуву  $\theta$  гармонійних коливань з коловою частотою  $\omega$  часовому зсуву  $\tau$ :

$$\tau = \frac{1}{\omega} \theta. \quad (1)$$

З метою підвищення точності вибирають частоту коливань якомога більшою. Але в такому разі навіть для невеликих порівняно значень шляху розповсюдження УЗ фазовий зсув  $\theta$  стає кумулятивним фазовим зсувом ( $\theta = N2\pi + \varphi_{\text{рад}}$ ) і, враховуючи радіоімпульсний характер коливань, не-

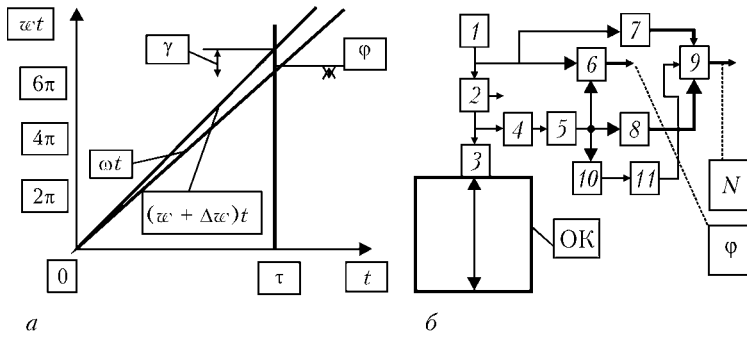


Рис. 1. Опосередкований метод вимірювання затримок УЗ сигналів шляхом визначення кумулятивного фазового зсуву: 1 — генератор (частотний синтезатор); 2 — ключ; 3 — п'єзоперетворювач; 4 — двохсторонній обмежувач рівня сигналу; 5 — підсилювач; 6 — цифровий фазометр; 7, 8 — тригерні лічильники; 9 — формувач різницевого коду; 10 — амплітудний детектор; 11 — компаратор

обхідно не тільки вимірювати фазовий зсув  $\varphi$ , де  $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ , але й визначити ціле значення фазових циклів  $2\pi$  — число  $N$ .

Ультразвуковий радіоімпульсний сигнал має бути достатньої часової довжини для можливості виконання фазових вимірювань такого сигналу відносно нульової фази опорного колювання. Тому кількість періодів несучого колювання радіоімпульсу з урахуванням перехідних процесів на початку радіоімпульсу бажано мати не менше за 15...20 і для того, щоб збуджуване радіоімпульсне УЗ колювання мало б теж нульову початкову фазу, його формуємо з сигналу опорного генератору, пропускаючи цей сигнал через відкритий на час існування радіоімпульсу електронний ключ, який відкривається у момент проходження сигналом нульового значення напруги генератору.

Для зручності подальших пояснень розглянемо, як приклад, визначення фазової затримки УЗ сигналу при його проходженні товщини сталюого зразка у луноімпульсному режимі (рис. 1, а).

При товщині сталюого зразка  $h$  для нормально введеного УЗ сигналу частоти  $\omega$  луносигнал, відбитий від дна зразка, затримується в часі на величину  $\tau$ . Якщо  $\tau \gg T$ , де  $T$  — період сигналу, то фазовий зсув вихідного сигналу чотирьохполосника можемо представити як кумулятивний зсув  $\theta = N2\pi + \varphi + \pi$  ( $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ ). Додатковий набіг фази  $\pi$  виникає при відбитті від нижнього краю зразка, який граничить з повітрям.

З метою використання часової затримки в матеріалі для визначення швидкості ультразвуку додатковий скачок фази за рахунок відбиття від краю зразка маємо відкинути. Тому далі використовуємо значення  $\theta$  як  $\theta_0 = N2\pi + \varphi$ .

Часове запізнення УЗ сигналу можемо визначити, знаючи частоту цього сигналу і фазовий зсув  $\theta$ :

$$\tau = \frac{\theta_0}{\omega} = \frac{N2\pi + \varphi}{\omega} \quad (2)$$

Враховуючи те, що фазовий зсув  $\varphi$  колювання радіоімпульсного сигналу можемо вимірювати за допомогою фазометрів, розглянемо шляхи визначення цілого числа фазових циклів  $2\pi$  у значенні кумулятивного фазового зсуву. Можливі два способи виконання такого визначення [5].

Розглянемо можливість визначення числа цілих фазових циклів у значенні кумулятивного фазового зсуву шляхом вимірювань фазових зсувів вихідних сигналів на двох близьких за частотою сигналах. Частота одного з цих сигналів  $\omega$  та іншого  $\omega + \Omega$ , де  $\Omega \ll \omega$ , вибираються, виходячи з умови збереження для обох частот незмінним значення цілого числа фазових циклів кумулятивних фазових зсувів.

Значення частот  $\omega$  та  $\omega + \Omega$  у разі використання частотного синтезатору можуть підбиратися за значеннями фазових зсувів сигналів експериментально. Частоту  $\omega$  вибираємо такою, щоб фазовий зсув луносигналу був приблизно  $180...225^\circ$ , а частоту  $\omega + \Omega$  вибираємо з умови досягнення фазового зсуву  $270...295^\circ$ . Тоді після віднімання значення фазового скачку при відбитті колювань від нижнього краю зразка матимемо фазові набіги за рахунок затримок у матеріалі зразка  $0 \leq \varphi \leq 45^\circ$  для частоти  $\omega$  і  $90 \leq \gamma \leq 115^\circ$  для частоти  $\omega + \Omega$ .

Враховуючи те, що отримані таким чином фазові зсуви сигналів на вибраних частотах знаходяться у межах значення фазового циклу  $2\pi$  ( $360^\circ$ ), запишемо вирази для величини часової затримки сигналу на виході чотирьохполосника для обох настільки близьких за значеннями частот сигналів, щоб знехтувати дисперсією швидкості розповсюдження цих сигналів:

$$\tau = \frac{1}{\omega}(N2\pi + \varphi_{\text{рад}}) = \frac{1}{360^\circ f}(N360^\circ + \varphi^\circ), \quad (3)$$

$$\tau = \frac{1}{\omega + \Omega}(N2\pi + \gamma_{\text{рад}}) = \frac{1}{360^\circ f}(N360^\circ + \gamma^\circ). \quad (4)$$

Прирівнявши праві частини рівнянь, знаходимо значення  $N$  як позитивне ціле число наступного виразу:



$$N = \left| \frac{\gamma_{\text{рад}} \omega - \varphi_{\text{рад}}(\omega + \Omega)}{2\pi\Omega} \right|^+ = \left| \frac{\gamma^{\circ} f - \varphi^{\circ}(f + F)}{360^{\circ} F} \right|^+ \quad (5)$$

Підставляючи значення (5) у вираз (3) або (4), визначаємо величину часової затримки сигналу:

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{1}{\omega} \left| \frac{\gamma_{\text{рад}} \omega - \varphi_{\text{рад}}(\omega + \Omega)}{2\pi\Omega} \right|^+ 2\pi + \varphi_{\text{рад}} = \\ &= \frac{1}{360^{\circ} f} \left\{ \left| \frac{\gamma^{\circ} f - \varphi^{\circ}(f + F)}{360^{\circ} F} \right|^+ 360^{\circ} + \varphi^{\circ} \right\}. \quad (6) \end{aligned}$$

Враховуючи високу стабільність частот сигналів на виході частотного синтезатору ( $\delta_f \leq 10^{-4}$ ), визначимо допустиму похибку вимірювання фазових зсувів  $\varphi$  та  $\gamma$  на вибраних частотах. Основні вимоги до точності вимірювання фазових зсувів ставить необхідність безпомилкового визначення значення  $N$ .

Зрозуміло, що вимоги до точності тим більші, чим більше значення  $N$ . Так, для  $N \leq 20$  допустиме значення похибки вимірювання фазових зсувів становить  $\pm 0,5^{\circ}$ , для  $N \leq 40$  похибка не повинна перевищувати  $\pm 0,2^{\circ}$ . З подальшим зростанням числа  $N$  вимоги до точності вимірювання фазових зсувів стають нездійсненними.

Розглянемо другий метод визначення кумулятивного фазового зсуву, який схематично представлено на рис. 1, б. Сигнал генератора і підсилений луносигнал посилаються кожний на свій тригерний лічильник 7, 8 числа періодів коливання. Число тригерів кожного лічильника вибираємо з умови  $(2^{k+1} - 1) > N$ , де  $N$  — число цілих значень фазових циклів  $2\pi$  кумулятивного фазового зсуву луносигналу.

Часова затримка вихідного луносигналу приводить до затримки заповнення лічильника 8 порівняно з аналогічним заповненням лічильником 7. Різниця поточних кодів лічильників дорівнює кількості повних  $N$  періодів сигналів, які відповідають цілому числу фазових циклів кумулятивного фазового зсуву луносигналу відповідно до фази сигналу генератора. Замість двох лічильників можна було б використати реверсивний лічильник, вирішивши за допомогою логічних схем уникнення помилки у підрахунку періодів сигналів обох вхідних каналів у разі співпадання у часі їхніх фронтів.

Використання описаного вище методу визначення цілого числа фазових циклів у значенні кумулятивного фазового зсуву набагато спрощує вимоги до точності вимірювання фазового зсуву. Наприклад, якщо кумулятивний фазовий зсув становить  $\theta = 100 \cdot 360^{\circ} + 50^{\circ}$ , то навіть при похибці вимірювання фазового зсуву  $\pm 2,5^{\circ}$  відносна фазова похибка визначення кумулятивного фазового

зсуву і таким чином часової затримки УЗ сигналу не перевищить  $\delta_{\tau} = 7 \cdot 10^{-3} \%$ .

Вплив нестабільності частоти УЗ сигналу на визначення  $\tau$  при виборі генератору, в якому стабілізація частоти коливання досягається за допомогою кварцового п'єзоперетворювача, має порядок  $\delta_{\tau} \leq 10^{-2} \%$ . Таким чином, сумарна похибка визначення часової затримки УЗ сигналу не перевищує 0,01 %.

**Вимірювання фазового зсуву радіоімпульсних коливань.** Вимірювання фазового зсуву коливань радіоімпульсу, довжина якого складає лише 3 мкс, є непростю задачею, проте нами розроблено і апробовано ряд методів таких вимірювань [5].

До найбільш широковживаного методу віднесемо метод фазового детектування, який реалізується за допомогою фазових детекторів, наприклад, на основі використання подвійних балансних модуляторів (мікросхема МС-601R фірми «Hirose Electronics»). Постійне значення напруги на виході фазового детектору при подачі на його входи вимірювального сигналу і напруги генератору як сигналу з опорною (нульовою) фазою, становить:

$$U_1 = kU_m \cos\varphi. \quad (7)$$

Тут  $U_m$ ,  $\varphi$  — відповідно амплітуда і фазовий зсув вимірювального сигналу;  $k$  — коефіцієнт пропорційності, значення якого залежить від амплітуди сигналу опорної фази, параметрів нелінійності вольт-амперних характеристик діодів подвійного балансного модулятора.

Для того, щоб уникнути впливу амплітуди сигналу на результат визначення фазового зсуву, децю ускладнимо схему вимірювання за рахунок використання другого фазового детектора з підключенням на нього квадратурного за фазою сигналу опорної фази. Вихідна постійна напруга такого детектора становить:

$$U_2 = kU_m \sin\varphi. \quad (8)$$

Маючи обидва значення напруг (7) і (8), знаходимо значення фазового зсуву наступним чином:

$$\varphi = \arctg\left(\frac{U_2}{U_1}\right). \quad (9)$$

Враховуючи неоднозначність тригонометричних функцій на інтервалі фазових зсувів  $0 \leq \varphi \leq 360^{\circ}$  та залежність знаків напруг на виходах першого та другого фазових детекторів, визначимо правило однозначного визначення значення фазового зсуву:

якщо  $U_1 > 0$  (7), а  $U_2$  (8) може бути як  $U_2 > 0$ , так і  $U_2 < 0$ , фазовий зсув  $\varphi$  знаходиться у межах  $-\pi/2 \leq \varphi \leq \pi/2$  і його значення однозначно визначається за допомогою виразу (9);



якщо  $U_1 < 0$ , а  $U_2 > 0$ , значення фазового зсуву визначається наступним чином:

$$\varphi = \arctg\left(\frac{U_2}{U_1}\right) - \pi, \quad (10)$$

$$\pi/2 \leq \varphi \leq \pi;$$

якщо  $U_1 > 0$ ,  $U_2 > 0$ , значення фазового зсуву знаходимо за виразом:

$$\varphi = \arctg\left(\frac{U_2}{U_1}\right) + \pi, \quad (11)$$

$$\pi \leq \varphi \leq 3/2\pi.$$

Для радіоімпульсного вимірювального сигналу вихідні напруги фазових детекторів представляються відеоімпульсами з встановленими на певному інтервалі значеннями напруг відповідно  $U_1$  та  $U_2$ . Час встановлення напруг залежить від постійної часу фільтрів нижніх частот на виходах фазових детекторів (реально до 5...10 періодів вхідних сигналів).

Описаний вище метод завдяки операції перемноження сигналів у фазових детекторах назвемо кореляційним, адже вихідна напруга фазового детектора пропорційна значенню кореляційної функції вимірювального і опорного сигналів.

Точність описаного методу фазового вимірювання залежить в першу чергу від точності формування квадратурного за фазою сигналу зі збереженням незмінної амплітуди цього сигналу порівняно з сигналом опорної фази. Загальна похибка вимірювання фазового зсуву розглянутим методом у випадку корекції адитивної похибки шляхом підключення до входів вимірювача сигналів з нульовим фазовим зсувом (підключення на обидва входи одного й того ж сигналу) може сягати десятих градусів.

Розглянемо інший метод вимірювання фазових зсувів, який нами названий методом імпульсно-фазового детектування. Цей метод передбачає використання двох синхронних вибірок обох сигналів, зсунутих за часом на чверть періоду сигналів. Якщо представити сигнал з опорною фазою і вимірювальний сигнал гармонійними функціями

$$u_0(t) = U_{m0} \sin \omega t,$$

$$u_C(t) = U_{mC} \sin (\omega t + \varphi), \quad (12)$$

то значення вибірок сигналів в довільний момент  $t$  та  $(t + T/4)$  відповідно становлять:

$$u_0(t_B) = U_{m0} \sin \omega t_B,$$

$$u_0\left(t_B + \frac{T}{4}\right) = U_{m0} \cos (\omega t_B); \quad (13)$$

$$u_C(t_B) = U_{mC} \sin (\omega t_B + \varphi);$$

$$u_C\left(t_B + \frac{T}{4}\right) = U_{mC} \cos (\omega t_B + \varphi). \quad (14)$$

Такі значення вибірок сигналів дають можливість в системі часу вибірок визначити фазу кожного з сигналів:

$$\psi_0 = \arctg\left(\frac{u_0(t_B)}{u_0(t_B + T/4)}\right), \quad \psi_C = \arctg\left(\frac{u_C(t_B)}{u_C(t_B + T/4)}\right). \quad (15)$$

Однозначне визначення значень фаз сигналів  $\psi_0$ ,  $\psi_C$  виконується за алгоритмами (9)–(11).

Різниця фаз  $\varphi$  становить:

$$\varphi = \psi_C - \psi_0. \quad (16)$$

**Визначення шляху розповсюдження УЗ сигналу.** Розглянемо можливість визначення лінійної довжини шляху проходження луносигналу при нормальному впровадженні ультразвуку у контрольоване середовище за рахунок фазового методу вимірювання часової затримки цього луносигналу. Розглянемо процес визначення товщини матеріалу плоскопаралельної пластини металу згідно рис. 2.

Випромінювач і приймач УЗ коливань мають поперечні розміри менші за  $6\lambda$  ( $\lambda$  — довжина хвилі коливань у середовищі контролю), що розширює діаграму направленості як збудника (перетворювач 1), так і приймача (перетворювач 2). Це і забезпечує прийом радіоімпульсних повздовжніх коливань, відбитих від дна об'єкта контролю (ОК) не тільки перетворювачем 1, але й перетворювачем 2.

Запишемо вирази для швидкості розповсюдження коливань відповідно до обох напрямків їх прийому. При цьому враховуємо різні величини часових затримок:  $\tau_1$  — затримка прийому коливань перетворювачем 1,  $\tau_2$  — затримка коливань, відбитих від дна і прийнятих перетворювачем 2.

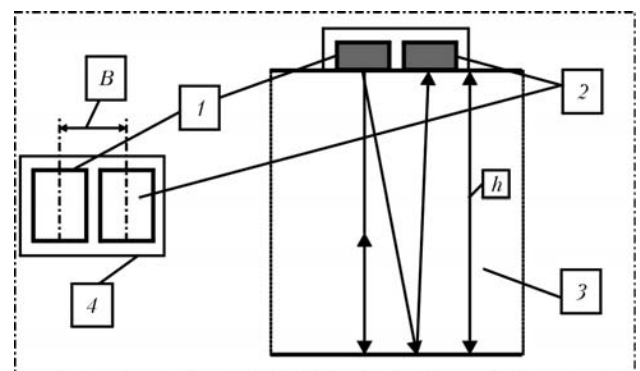


Рис. 2. Вимірювання товщини плоскопаралельного виробу зі сталі: 1 — прямокутний збудник-приймач коливань; 2 — прямокутний приймач коливань; 3 — матеріал ОК; 4 — сполучений акустичний перетворювач з розділеним випромінюванням та прийомом коливань





Отримана система рівнянь має вигляд:

$$C_1 = \frac{2h}{\tau_1}, \quad C_1 = \frac{2\sqrt{h^2 + (B/2)^2}}{\tau_2}. \quad (17)$$

Прирівняємо праві частини отриманих рівнянь (17) і визначимо значення  $h$ :

$$h = \frac{B}{2\sqrt{\tau_2^2 - \tau_1^2}}. \quad (18)$$

Визначена товщина ОК дозволяє нам визначити швидкість розповсюдження УЗ коливань згідно (17):

$$C_1 = \frac{B}{\tau_1 \sqrt{\tau_2^2 - \tau_1^2}}. \quad (19)$$

При визначенні значень часових затримок враховано додаткові набіги фазових зсувів при відбитті сигналів від дна ОК. Забезпечена висока (не менша 0,01 %) точність взаємного лінійного розміщення п'єзокерамічних пластин у конструкції роздільного акустичного перетворювача. За цих умов гарантована точність визначення ультразвукової швидкості  $\delta_C = 10^{-2} \%$ .

### Висновки

Розглянутий метод визначення швидкості УЗ коливань може бути інтерпретований для визначення швидкості любых видів коливань у любых напрямках їх розповсюдження. Використовуючи фазовий метод визначення затримок коливань та довжини шляхів їх розповсюдження можемо досягти високої точності (не гірше 0,01 %) визначення УЗ швидкостей.

Використовуючи подібні вимірювачі ультразвукової швидкості, можемо контролювати векторні величини механічних напружень в конструкційних матеріалах та, що головне, контролювати степінь утоми матеріалів та визначати їхній залишковий ресурс міцності за величиною зміни швидкості розповсюдження УЗ коливань.

*Известны методы оценки механических напряжений, а также степени деградации внутренней структуры конструкционных материалов (усталости материалов) путём контроля изменений фазовой скорости высокочастотных УЗ колебаний. Известно, что необходимая точность таких*

*измерений должна быть не менее 0,01 %. Это значит, что с такой точностью необходимо измерять как длину пути распространения УЗ колебаний в контролируемом материале, так и время задержки этих колебаний.*

*Рассмотрена возможность определения скорости распространения продольных УЗ колебаний с заданной точностью, измеряя временную задержку и длину пути распространения колебаний на основе измерения кумулятивных фазовых сдвигов этих колебаний. Подробно описаны методы фазовых измерений радиоимпульсных УЗ колебаний, требования к длительности этих колебаний, а также методы определения числа целых фазовых циклов в значениях кумулятивных фазовых сдвигов.*

*Один из методов предусматривает измерение значения кумулятивного фазового сдвига УЗ радиоимпульсных колебаний на двух настолько близких частотах, чтобы можно было пренебречь дисперсией скорости колебаний. Другой метод предусматривает определение числа полных фазовых циклов в значении кумулятивного фазового сдвига путем определения разницы текущих кодов двух счётчиков импульсов, на входы которых подаются непрерывный сигнал задающего генератора и выходной сигнал УЗ преобразователя соответственно. На время существования принятого преобразователем отраженного от тыльной стороны контролируемого элемента конструкции радиоимпульса колебаний разностный код счётчиков импульсов сохраняется неизменным.*

*Выполненный анализ погрешностей измерений подтвердил достижимость упомянутой точности определения скорости ультразвука в элементах стальных конструкций.*

1. Allen D. R., Cooper W. H. B. A Fourier Transform Technique that measuring Phase Delay Between Ultrasonic Impulses with Sufficient Accuracy to Determine Residual Stresses in Metals // NDT International. — 1983. — 16, № 4.
2. Stamm H. An Overview of the Ultrasonic Detection of Creep Damage // The European J. of Non-Destructive Testing. — 1992. — 1, № 4.
3. Крауткремер Й., Крауткремер Г. Ультразвуковой контроль материалов: Справ. — М.: Высш. шк., 1991. — С. 636–642.
4. Ермолов И. Н., Алешин Н. П., Потапов А. И. Неразрушающий контроль. — Кн. 2. — М.: Высш. шк., 1991. — С. 247–264.
5. Вимірювання різниці фаз у радіоелектроніці / М. Т. Бова, В. О. Гойжевський, С. М. Маєвський, В. В. Молебний. — Київ: Вища шк., 1972. — 262 с.



## ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ САУЗК ТРУБ СРЕДНЕГО И БОЛЬШОГО ДИАМЕТРОВ НА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПЛОЩАДЯХ ОАО «ХТЗ»

А. В. ЮРЧЕНКО, И. Я. ШЕВЧЕНКО, А. В. СУББОТА, А. Н. ФИЛИППОВ, Р. С. СЕРЕДА

*Описан опыт внедрения и эксплуатации систем автоматизированного ультразвукового контроля (САУЗК) продольных сварных швов и концевых участков труб большого и среднего диаметров производства ЗАО «УкрНИИНК» на производственных площадях ОАО «ХТЗ».*

*This article describes the experience of implementation and service of automated systems of ultrasonic inspection (AUIS) of longitudinal welds and pipes ends of large and effective diameters, manufactured by «UkrNIINK» (Ukrainian scientific research institute for NDT) at production facilities of OJSC «KhTZ».*

В условиях мирового кризиса ЗАО «Укр НИИНК», как и другие научные и производственные организации Украины и стран СНГ, вырабатывает новые стратегии развития, направленные на расширение спектра выпускаемой продукции, а также на улучшение конкурентоспособности. Однако несмотря на расширение деятельности, одним из самых приоритетных и перспективных направлений работы УкрНИИНК остается разработка систем автоматизированного ультразвукового и вихретокового контроля для трубной промышленности. С каждым годом продукция отечественных металлургических предприятий становится все более конкурентоспособной по сравнению с продукцией зарубежных производителей, чему способствует повышение уровня выходного контроля качества и вместе с этим более низкий уровень цен.

Многолетний опыт УкрНИИНК в данной отрасли, реализованные проекты, а также сотрудничество с крупными промышленными предприятиями–производителями трубной продукции на сегодняшний день обеспечивают хорошую базу для поддержания надежной работы реализованных систем НК и реализации новых проектов.

Таким образом, плодотворная работа института в период с 2006 по 2008 гг. и тесное сотрудничество с Харцызским трубным заводом (ХТЗ) привели к созданию и внедрению на производственных площадях завода САУЗК концевых участков и продольного сварного шва выпускаемых труб.

На сегодня в производственных линиях ОАО «ХТЗ» смонтированы и эксплуатируются четыре системы автоматизированного контроля: три предназначены для контроля продольного сварного шва и одна — для контроля концевых участков труб. Также на производственных линиях ТЭСЦ № 2 Харцызского трубного завода внедрены промышленные многоканальные УЗ дефек-

тоскопы «Унискан-ЛуЧ», для автоматизированного контроля совместно с имеющимся на заводе оборудованием УЗК.

Рассмотрим систему контроля концевых участков труб «САУЗК «Унискан-ЛуЧ» КТ-7», смонтированную в сдаточную производственную линию ТЭСЦ № 2 на ОАО «ХТЗ» (рис. 1). Внедрение системы позволило повысить качество автоматизированного контроля, производительность выходных линий цеха, а также обеспечило сохранение результатов контроля в цеховой базе данных для постоянного мониторинга технологического процесса. Система функционирует со второго квартала 2007 г. Загруженность системы зависит от общей загруженности цеха и формируется текущими заказами завода. Сегодня Харцызский трубный завод работает на полную мощность в два, либо три потока, в трехсменном режиме работы. За одну рабочую смену через пост УЗК концов труб проходит не менее 20 труб, т. е. за сутки через установку проходит около 60 труб. С начала



Рис. 1. Система автоматизированного УЗ контроля концевых участков труб в технологической линии ТЭСЦ № 2 ОАО «ХТЗ»

эксплуатации проконтролировано более 30000 труб различного сортамента.

Для постоянного поддержания уровня контроля качества выпускаемой продукции на заводе работает международная независимая инспекционная служба, которая контролирует технологические процессы выпуска продукции, а также работу оборудования, отвечающего за эти процессы. Для постоянного мониторинга качества контроля два раза в смену проводятся калибровки системы «САУЗК «Унискан-ЛуЧ» КТ-7» на стандартном образце предприятия (СОП). С помощью системы проводится контроль концевых участков труб на наличие в них расслоений, однако функционально она рассчитана также и на контроль продольно-ориентированных трещин. При качественном проведении калибровки оборудования обслуживающим персоналом выявление дефектов на СОП имеет 100%-ю повторяемость между четырехчасовыми проверками в течение суток и более без подстройки оборудования.

Что касается эксплуатационных характеристик системы, можно сказать, что система функционирует нормально, без сбоев в работе, с периодическими плановыми остановками для проведения технического обслуживания и настройки. В связи с усиленной эксплуатацией системы (круглосуточный режим работы), имеет место износ некоторых контактных элементов сканирующих устройств и блоков пьезоэлектрических преобразователей, хотя принципиально все указанные детали и узлы отрабатывают свой рабочий ресурс и требуют периодической замены. Что касается сбора, обработки и протоколирования информации по проконтролированным трубам сотрудники ОАО «ХТЗ» и ЗАО «УкрНИИНК» в период первых двух кварталов эксплуатации согласовали и оптимизировали программное обеспечение для более удобной работы с информацией, ее просмотра и анализа обслуживающим персоналом. По отзывам заводских специалистов функциональные возможности «САУЗК «Унискан-ЛуЧ» КТ-7», оговоренные на стадии разработки, избыточны и полностью перекрывают требования к проведению автоматизированного УЗК концов труб, так как закладывались с расчетом перспектив развития производственных мощностей ОАО «ХТЗ» и специализированных условий, поставленных заказчиками трубной продукции перед заводом.

За период эксплуатации «САУЗК «Унискан-ЛуЧ» КТ-7» показала себя как надежная система с широкими функциональными возможностями, позволяющая проводить автоматизированный одновременный контроль обоих концов труб с оперативной выдачей результатов контроля.

После успешного внедрения и первичной эксплуатации системы контроля концевых участков труб «САУЗК «Унискан-ЛуЧ» КТ-7» между за-



Рис. 2. Система автоматизированного УЗ контроля продольных сварных швов труб в технологической линии ТЭСЦ № 2 ОАО «ХТЗ»

водом и УкрНИИНК начались переговоры по вопросу поставки и монтажа нескольких систем автоматизированного контроля продольного сварного шва. В результате на склады ОАО «ХТЗ» было поставлено три системы «САУЗК «Унискан-ЛуЧ» ПШ-10» (рис. 2) в апреле 2008 г. и начались монтажные и пусконаладочные работы.

Внедрение систем осуществлялось поочередно с учетом всех нюансов и особенностей технологических процессов в цеху. Первая и вторая по счету системы были смонтированы в технологических линиях для проведения контроля труб после сварки рабочих швов, до экспандирования, заменив морально и физически устаревшее оборудование УЗК. В ходе начальной опытно-промышленной эксплуатации возникали различные вопросы, касающиеся совместной работы автоматики цеха и смонтированных систем, работы сканирующих устройств и электронной аппаратуры в связи с тяжелыми цеховыми условиями на данном технологическом этапе: вибрация, влияние «неправильной» геометрии труб, выходящих из стана сварки, высокие температуры тела трубы в околошовной зоне, повышенная влажность воздуха и многие другие факторы. Таким образом, запуск систем в работу требовал не только времени и средств, но и технической грамотности и профессионального опыта специалистов ОАО «ХТЗ» и ЗАО «УкрНИИНК3».

В ходе первичной эксплуатации практически сразу были фактически подтверждены преимущества систем, заложенные в технических требованиях завода на стадии разработки оборудования и технологии проведения контроля на посту УЗК. Системы поставлялись на завод в двух модификациях: система одномодульная САУЗК ПШ-10м и двухмодульная САУЗК ПШ-10. Отличием является наличие в двухмодульной системе двух аналогичных модулей УЗК, расположенных последовательно через 6 м и дающих возможность в два раза быстрее контролировать трубу длиной



12 м, а также сократить ход рабочей тележки, размещающей на позиции контроля сразу две трубы и, следовательно, уплотняя поток производственной линии. Также автоматические алгоритмы, заложенные в автоматику поста контроля, позволили проводить непрерывный цикл контроля двухшовных трубы без вмешательства оператора. Эти и многие другие технические решения дали возможность заметно повысить производительность контроля.

Последняя, третья двухмодульная система была запущена в промышленную эксплуатацию в октябре 2008 г. в «сдаточной» линии ТЭСЦ № 2. Требования к этой системе были особенно высокими в связи с тем, что на ней проводится выходной контроль качества продукции. Можно сказать, что специалисты завода на момент внедрения всех трех систем имели огромный практический опыт работы с подобным оборудованием.

Третья система заняла достойное место рядом с аналогичными системами производства таких мировых брендов в сфере НК, как ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, Kraut Kramer, Karl Deutch и, несмотря на ожидаемые сложности при старте в работе с новым оборудованием, заводские специалисты освоили все рабочие режимы систем и успешно их эксплуатируют.

Несмотря на застой в украинской промышленности в конце 2008 – начале 2009 гг., ОАО «ХТЗ» продолжает интенсивно работать, повышает производственные мощности, качество и объемы выпускаемой заводом продукции. В основе достигнутых результатов по внедрению и эксплуатации нового оборудования УЗК на производственных площадях ОАО «ХТЗ» лежит совместная трехлетняя плодотворная работа и тесное сотрудничество специалистов ОАО «ХТЗ» и ЗАО «УкрНИИНК».

ЗАО «УкрНИИНК», Киев  
АЦНК Ин-та электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев  
ОАО «ХТЗ», Харьков

Поступила в редакцию  
16.05.2009

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

Стоимость подписки через редакцию*	Украина		Россия		Страны дальнего зарубежья	
	на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
	160 грн.	320 грн.	700 руб.	1400 руб.	26 дол. США	52 дол. США
*В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.						

Если Вас заинтересовало наше предложение по оформлению подписки через редакцию, пожалуйста, отправьте заявку по факсу или электронной почте. **Контактные телефоны:** (38044) 271-26-23; 529-26-23; факс: (38044) 528-34-84, 529-26-23.

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

### РЕКЛАМА в журнале «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»

#### Обложка наружная, полноцветная

Первая страница обложки (190×190мм) — 700\$  
Вторая страница обложки (200×290мм) — 550\$  
Третья страница обложки (200×290мм) — 500\$  
Четвертая страница обложки (200×290мм) — 600\$

#### Обложка внутренняя, полноцветная

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

#### Внутренняя вставка

Полноцветная (разворот А3) (400×290мм) — 570\$  
Полноцветная (200×290мм) — 340\$  
Полноцветная (200×142мм) — 170\$  
Реклама в разделе информации  
Полноцветная (165×245мм) — 300\$  
Полноцветная (165×120мм) — 170\$  
Полноцветная (82×120мм) — 80\$  
• Оплата в гривнях или рублях РФ по официальному курсу  
• Для организаций-резидентов Украины цена с НДС и налогом на рекламу  
• Статья на правах рекламы — 50% стоимости рекламной площади  
• При заключении рекламных контактов на сумму, превышающую 1000\$, предусмотрена гибкая система скидок

#### Технические требования к рекламным материалам

- Размер журнала после обрезки 200×290мм
- В рекламных макетах, для текста, логотипов и других элементов необходимо отступать от края модуля на 5мм с целью избежания потери части информации
- **Все файлы в формате IBM PC**
- Corell Draw, версия до 10.0
- Adobe Photoshop, версия до 7.0
- QuarkXPress, версия до 7.0
- Изображения в формате TIFF, цветовая модель CMYK, разрешение 300 dpi
- К файлам должна прилагаться распечатка (макеты в формате Word не принимаются)

Подписано к печати 09.09.2009. Формат 60×84/8. Офсетная печать.  
Усл. печ. л. 8,64. Усл.-отт. 8,9. Уч.-изд. л. 8,6 + 8 цв. вклеек.  
Цена договорная. Печать ООО «Фирма «Эссе». 03142, г. Киев, просп. Акад. Вернадского, 34/1.

## КОЭРЦИТИМЕТРИЯ ДЕЛАЕТ ДИАГНОСТИКУ ДОСТОВЕРНЕЕ И ДЕШЕВЛЕ

Г. Я. БЕЗЛЮДЬКО, Е. И. ЕЛКИНА, Р. Н. СОЛОМАХА

*Коэрцитиметрия выделяет зоны концентрации напряжений, контролирует накопление усталостных изменений металла еще на микроуровне, ограничивает здесь момент начала процесса интенсивного образования уже макродефектов. Только начиная с этого момента результативна вся современная дефектоскопия. Тем самым коэрцитиметрия позволяет сосредоточить усилия дефектоскопистов в нужном месте и в нужное время, чем снижает суммарные расходы на диагностику с улучшением достоверности. Коэрцитиметрическая оценка ресурса (усталости) выражается в объективных числовых критериях, увеличивая достоверность экспертизы и уменьшая ее тенденциозность и субъективизм.*

Половина заявленных в заголовке эффективности и полезности — это собственные свойства магнитной характеристики металла — *коэрцитивной силы как информационного параметра неразрушающего контроля усталостного состояния*. Вторая половина проявляется при выполнении измерений только нашими приборами, поскольку на их показания меньше всего влияют такие традиционно мешающие факторы, как шероховатость, кривизна, ржавчина, защитное красочное или иное покрытие (до 5...6 мм), температура и т. д. Это позволяет реально отказаться от зачистки поверхности, что составляет половину себестоимости неразрушающего контроля.

Диагностика металлов по своей сути должна строиться на оценке усталости и дефектоскопии, поскольку дефекты — это следствие накопленной усталости. Реально и у нас, и в мире диагностика строится только на дефектоскопических критериях, так как практических методов и инструментов контроля текущего усталостного состояния до сих пор просто не было. Естественно, достоверность результатов такой односторонней экспертизы всегда заставляла желать лучшего. И сегодня коэрцитиметрия — итог нашей многолетней работы — в полной мере эту проблему решает.

Усталостные дефекты в процессе эксплуатации появляются только на завершающих стадиях срока службы как естественный результат деградации металла. Без усталостных изменений определенного уровня усталостных дефектов в нем не может быть. Поэтому диагностика, построенная на наличии-отсутствии дефектов, учете их количества и скорости развития большую часть срока службы является формальной и непродуктивной. А при конструкционной закрепощенности пластического деформирования процессы макропластической деформации в контролируемом металле вообще не развиваются. Дефекты в традиционном их понимании здесь не образуются вплоть до начала разрушения, которое в таких случаях происходит лавинообразно и нередко сразу после совершенно безупречной дефектоскопии, поскольку поврежденность металла на микроуровне никакая практическая дефектоскопия сегодня не видит. А коэрцитиметрия любые усталостные изменения надежно контролирует количественно и качественно. Граничные значения коэрцитивной силы, соответствующие началу процессов интенсивного дефектообразования, для большинства конструкционных сталей уже известны или легко уточняются испытанием образцов. Таким образом, коэрцитиметрия дополняет диагностику новыми знаниями об усталостном состоянии металла, причем в виде четких числовых критериев, хорошо проверяемых, воспроизводимых и документируемых. Но наибольший полезный эффект все участники диагностического процесса, от исполнителя до заказчика, получают, если коэрцитиметрия не просто дополняет, а координирует все его составляющие. Выполненная первой обзорная коэрцитиметрия объекта (а это самый дешевый вид неразрушающего контроля) наглядно характеризует общее состояние, указывает зоны концентрации напряжений, степень усталостной поврежденности металла в них. Металл, находящийся в начальной стадии развития усталостных процессов, не может иметь макроповреждений, поэтому в дефектоскопии не нуждается. В то же время зоны с опасным уровнем деградации подлежат углубленному контролю, в т. ч. и на дефектность. Не секрет, что большинство методических руководств по дефектоскопии содержат лукавую фразу типа «проверяется 10...15 % металла по выбору». С помощью данных коэрцитиметрии такой выбор становится действительно объективным,



когда дефектоскопия выполняется делается только там, где этого требует текущее состояние металла, и не делается там, где это будет пустой тратой сил, времени, материалов и средств.

Оценка отработанного ресурса на основе коэрцитиметрического контроля накопленной усталости также является численной, точной и объективной, так как определяется не отработанным временем, а реальным состоянием металла, которое зависит не только от уровня приложенных механических нагрузок, но и от всей совокупности эксплуатационных факторов — вибрации, коррозии, температуры, агрессивности среды, конструкционных и монтажных нагрузок и т. д. Скорость исчерпания ресурса легко вычислить, что позволяет также точно и объективно при данном режиме эксплуатации прогнозировать остаточный ресурс по установленной коэрцитиметрическими измерениями реальной скорости деградации металла. По скорости накопления усталости металла также можно разумно назначать сроки проведения обследований объекта, когда состояние металла будет этого действительно требовать, а не по формальному графику. Тактика и стратегия ремонта усталостных проявлений в контролируемом оборудовании с использованием данных коэрцитиметрии приобретает совсем иное и осмысленное содержание. Так, заваривать усталостные трещины надо только при сопутствующем усилении — ремонте всей зоны, в которой трещина появилась. Окружающий металл здесь уже перешел в пластическое состояние, и новая трещина без такого усиления не замедлит появиться рядом с заваренной. Кроме того, на коэрцитиметрической основе диагностика, наконец, имеет возможность реализовать свои не столько констатирующие, сколько упреждающие возможности, чтобы не допускать опасных тенденций в развитии усталостных процессов. Недопущение аварий всегда выгоднее, чем ликвидация их последствий.

Там, где это целесообразно, технически и экономически реализуют стационарные многодатчиковые коэрцитиметрические системы мониторинга напряженно-деформированного и усталостного состояния металла. Не говоря о безопасности, данные измерений таких систем нередко ломают все привычные представления специалистов-прочнистов о режимах работы и характере реальных нагрузок.

Коэрцитиметрический контроль металла сварных соединений точно обозначает потребность в проведении дефектоскопии и при такой необходимости делает дефектоскопию заметно продуктивнее, локализуя зоны поиска дефектов. А среднее значение величины коэрцитивной силы и ее среднеквадратическое отклонение, если их ввести как численные служебные характеристики данного шва, надежно указывают наиболее проблемные швы из общего их количества на контролируемом объекте, столь же четко выделяя и те, которые в дефектоскопии не нуждаются ввиду отсутствия признаков усталостных изменений металла шва и в зоне термовлияния. Полученные данные четко паспортизируются с численными и всегда подлежащими проверке показателями контроля.

Совместно с российскими специалистами заканчивается изготовление робота-диагноста, который легко передвигается по вертикальным и куполообразным поверхностям и трубопроводам. Работает круглосуточно и на действующем оборудовании, ведет 100%-ную видеосъемку контролируемых поверхностей и дополняет это такой же полной коэрцитиметрией и толщинометрией (нашим бесконтактным ЭМА-толщиномером) с документированием результатов. Здесь достоверность получаемых данных еще выше, так как уменьшается негативная роль субъективного человеческого фактора, и при этом легко наращивается объем получаемой информации о металле без удорожания работ. Этой работой мы поднимаем такой неразрушающий контроль усталости металла на самый высокий организационный и исполнительский уровень.

Очевидно, что коэрцитиметрия в форме наших начинаний полезна всем добросовестным участникам диагностического процесса — от исполнителей до заказчиков. Административно навязываемая и предписываемая диагностика уходит в прошлое необратимо. И только от нас всех зависит, станет ли диагностика объективно востребованной, дающей нам интересную работу и способствующей изменениям к лучшему всей окружающей действительности (см. рекламу на 3-й стр. обложки).

**ООО фирма «Специальные Научные Разработки»,  
г. Харьков, тел./факс: (057) 771-65-91, 738-32-06, e-mail: mail@snr-ndt.com**