

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

№ 2, 2009

Издается с января 1989 г.

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

Издатель: Международная ассоциация «Сварка»

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор
Б.Е.ПАТОН

А. Я. Недосека (зам. гл. ред.),
В. А. Троицкий (зам. гл. ред.),
З. А. Майдан (отв. секр.),
Н. П. Алешин, А. И. Бондаренко,
В. Л. Венгринович, А. А. Грузд,
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, И. С. Дмитрук

Свидетельство
о государственной регистрации
КВ 4787 от 09.01.2001

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

При перепечатке материалов ссылка
на журнал обязательна

За содержание рекламных
материалов редакция журнала ответ-
ственности не несет

Цена договорная

СОДЕРЖАНИЕ

НОВОСТИ 3

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА

НЕДОСЕКА А. Я., НЕДОСЕКА С. А., БОЙЧУК О. И., КУШНИРЕНКО С. А., ЯРЕМЕНКО М. А., ФЕДЧУК Ю., ЕЛКИН А. А., ОБОДОВСКИЙ Б. М. Особенности функционирования технологических трубопроводов при высоких температурах 5
ФОМИЧЕВ С. К., МИНАКОВ С. Н., МИХАЛКО С. В., ЯРЕМЕНКО М. А., МИНАКОВ А. С. Определение силовых воздействий на трубопровод по анализу эпюр распределения продольных напряжений 11
БАБИЧЕВ А. С., БАБИЧЕВ С. А., ШАРКО А. В. Модель учета влияния сопутствующих факторов на точность определения механических характеристик металлов на основе сети Байеса 15

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

ЛОБАНОВ Л. М., НЕХОТЯЩИЙ В. А., РАБКИНА М. Д. Магнитный контроль при изготовлении сварных баллонов 21
САНДОМИРСКИЙ С. Г. Исследование намагничивания изделий неоднородного сечения для магнитного контроля физико-механических свойств 25
ЛЮТАК І. З. Побудова та обчислення математичної моделі поширення кільцевих мод в трубопроводі спрямованими хвилями в ультразвуковому діапазоні частот 30
ЦИРУЛЬНИК О. Т. Оцінка деградації властивостей як характеристика технічного стану матеріалів конструкцій тривалої експлуатації 36
БОНДАРЕНКО А. И. Технологические особенности дефектоскопии протяженных трубопроводов низкочастотными направленными волнами 42

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

БАРВИНКО Ю. П. Оценка работоспособности заводских вертикальных сварных соединений из стали 09Г2С-12 стенки рулонированных резервуаров для хранения нефти после 20-25 лет эксплуатации 50

СЕРТИФИКАЦИЯ И СТАНДАРТИЗАЦИЯ

АБРАМОВА Е. В., БАТОВ Г. П. Подготовка и сертификация персонала в области теплового контроля и метода оценки напряженно-деформированного состояния объектов 55

ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ

К 45-летию НИИ интроскопии 57
Чотирнадцята міжнародна науково-технічна конференція «ЛЕОТЕСТ-2009» в с. Славське 58
Международная специализированная выставка и конференция NDT RUS-SIA — «Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности» 59
Итоги V Международной научно-технической конференции «Диагностика оборудования и конструкций с использованием магнитной памяти металла» 61
XVIII Всероссийская конференция «Неразрушающий контроль и техническая диагностика» 62

ИЗДАНИЕ ЖУРНАЛА ПОДДЕРЖИВАЮТ:

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



Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики

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

Publisher: *International Association «Welding»*

EDITORIAL BOARD:

Editor-in-Chief
B. E. PATON

A. Ya. Nedoseka (vice-chief ed.),
V. A. Troitsky (vice-chief ed.),
Z. A. Maidan (exec. secr.),
N. P. Aleshin, 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,
I. S. Batasheva

State Registration Certificate
KV 4787 of 09.01.2001

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

CONTENTS

NEWS	3
TECHNICAL DIAGNOSTICS	
<i>NEDOSEKA A. Ya., NEDOSEKA S. A., BOICHUK O. I., KUSHNIRENKO S. A., YAREMENKO M. A., FEDCHUN A. Yu., ELKIN A. A., OBODOVSKII B. M.</i> Features of functioning of process pipelines at high temperatures	5
<i>FOMICHEV S. K., MINAKOV S. N., MIKHALKO S. V., YAREMENKO M. A., MINAKOV A. S.</i> Determination of force impacts on a pipeline by analysis of longitudinal stress distribution epures	11
<i>BABICHEV A. S., BABICHEV S. A., SHARKO A. V.</i> Model of allowing for the influence of concurrent factors on the accuracy of determination of mechanical characteristics of metals based on Bayesian network	15
NON-DESTRUCTIVE TESTING	
<i>LOBANOV L. M., NEKHOTYASHCHII V. A., RABKINA M. D.</i> Magnetic inspection in welded cylinder manufacture	21
<i>SANDOMIRSKII S. G.</i> Investigation of magnetization of products of a non-uniform section for magnetic inspection of physico-mechanical properties	25
<i>LYUTAK I. Z.</i> Construction and calculation of a mathematical model of circumferential mode propagation in a pipeline by directional waves in the ultrasonic frequency range	30
<i>TSIRYULNIK O. T.</i> Assessment of degradation of properties as a characteristic of technical condition of materials in long-term structures	36
<i>BONDARENKO A. I.</i> Technological features of flaw detection in extended pipelines using low-frequency directional waves	42
INDUSTRIAL	
<i>BARVINKO Yu. P.</i> Assessment of performance of shop vertical welded joints of steel 09G2S-12 of a wall of coiled oil tanks after 20-25 years of service	50
CERTIFICATION AND STANDARDIZATION	
<i>ABRAMOVA E. V., BATOV G. P.</i> Personnel training and certification in the field of thermal control and method of assessment of the stress-strain state	55
CURRENT EVENTS AND INFORMATION	
To the 45th anniversary of SRI of Introscopy	57
14th International Scientific-Technical Conference «LEOTEST-2009» in Slavsk	58
International Specialized Exhibition and Conference NDT RUSSIA «Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics in Industry»	59
Summary of the Vth International Scientific-Technical Conference «Diagnostics of Equipment and Structures using Magnetic Memory of Metal»	61
XVII All-Russia Conference «Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics»	62

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

ВИДЕОЭНДОСКОП БЮДЖЕТНОГО КЛАССА MIGS

ООО НПФ «Диагностические приборы» начала поставки видеоэндоскопов бюджетного класса, которые находят широкое применение в энергетике, авиации, нефтегазовой промышленности, автотехобслуживании, строительстве и т. п., там, где необходим внутренний осмотр узлов и деталей машин без полной разборки.

Серия видеоэндоскопов для промышленного применения **MIGS** включает встроенный 3,5" монитор, карту памяти на 512 Мб, USB-кабель для передачи изображения на компьютер и серию зондов по выбору потребителя длиной 1, 2, 3, 5, 10, 20, и 30 м. Большой выбор зондов позволяет укомплектовать видеоэндоскоп несколькими зондами разной длины. Регулируемая подсветка четырьмя LED светодиодами обеспечивает необходимую освещенность объекта контроля. Простым на-



жатием на оранжевую клавишу производится сохранение изображений и запись видеороликов. Последние достижения электроники позволили создать видеоэндоскоп, который в 15...20 раз дешевле известных моделей компаний Olympus, Everest, что делает его исключительно доступным для украинского потребителя.

УСТРОЙСТВО СКАНИРОВАНИЯ БАНДАЖЕЙ И ОБОДЬЕВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС УСБК-1

Научно-промышленной компанией «Луч» (г. Москва) разработано устройство сканирования **УСБК-1** для УЗК бандажей и ободов железнодорожных колес диаметром 950...1250 мм, являющееся составной частью комплексной системы УЗК.



Устройство обеспечивает:

- ✧ установку преобразователя для контроля обода на внутреннюю боковую поверхность обода колеса на фиксированном расстоянии от вершины обода под фиксированным углом к радиусу колеса;
- ✧ установку преобразователя для контроля гребня на внутреннюю боковую поверхность обода колеса на фиксированном расстоянии от вершины гребня под фиксированным углом к радиусу колеса;
- ✧ электрическую коммутацию последовательно для каждого преобразователя.

Объект контроля — бандажи и ободья колес локомотивов и вагонов электропоездов, колеса грузовых и пассажирских вагонов.

Контролируемые зоны, модели дефектов по инструкции ультразвукового контроля деталей локомотивов и вагонов электропоездов на базе программируемого дефектоскопа УД2-70 и используемые типы преобразователей приведены в таблице, прилагаемой к инструкции.

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС МЕГАСКАН-ЭМА

Производственным объединением «ДефектоКонтроль» (Великий Новгород, РФ) запущен в производство многоканальный программно-аппаратный комплекс (МПАК) «**МЕГАСКАН-ЭМА**», предназначенный для бесконтактного УЗК изделий сложной формы с применением электромагнитоакустических (ЭМА) преобразователей.

Назначение программного комплекса: реализация функций приборно-измерительного комплекса в автоматизированных установках, предназначенных для бесконтактного УЗ НК изделий сложной формы, в т. ч. и составных.

Функциональная основа программного комплекса: бесконтактный ЭМА метод, обеспечивающий возбуждение и прием трех типов УЗ, а именно:

- ✧ ввод сдвиговых поляризованных УЗ колебаний по нормали к поверхности;
- ✧ ввод сдвиговых УЗ колебаний, распространяющихся под углом 45° к поверхности контроля;
- ✧ возбуждение рэлеевской (поверхностной) волны в массе контролируемого изделия.

Особенности применения программного комплекса: выявление дефектов металлоизделий сложной формы проводится без механической зачистки поверхностей в зонах контроля, без применения контактной жидкости, а также в широком диапазоне температур поверхности изделий.

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТОЛЩИНОМЕР А1207С

ПО «ДефектоКонтроль» (Великий Новгород, РФ) разработан ультразвуковой толщиномер **А1207С** для оценки износа рельсов и измерения фактической толщины металлических деталей и узлов подвижного сос-

тава железнодорожного транспорта, измерения толщины стенок металлических и пластиковых труб, котлов, сосудов, обшивок с шероховатостью поверхностей до Rz160 и радиусом кривизны от 40 мм.



Особенности толщиномера:

- ✧ встроенный износостойкий совмещенный преобразователь на 2,5 МГц;
- ✧ возможность работы на сильном морозе;
- ✧ четыре предустановленные скорости ультразвука с возможностью их изменения; низкая стоимость;
- ✧ простота и удобство использования;
- ✧ малые габариты и масса;
- ✧ экономичность;
- ✧ возможность замены пользователем встроенного УЗ преобразователя;
- ✧ полный цифровой тракт;
- ✧ встроенный аккумулятор;
- ✧ разъем для внешнего источника питания и заряда аккумулятора.

Прибор обеспечивает выполнение измерений одновременно по всем измерительным каналам подключенных модулей в ОПЕРАТИВНОМ режиме, а также в режиме НАБЛЮДЕНИЯ с автоматической регистрацией тепловых потоков, температуры и влажности воздуха через интервалы времени, установленные пользователем.

Прибор оснащен функцией передачи данных на ПК и часами реального времени. Получаемая в процессе измерений информация автоматически архивируется и маркируется датой и временем измерения.

ТОЛЩИНОМЕР PosiTector 200 C/Std

Разработанный ЗАО «Газстройзыскания» (Москва) уникальный толщиномер покрытий PosiTector 200 B/Std позволяет измерить толщину полимерных покрытий на неметаллическом основании (дерево, пластмасса, композиты и т. п.). Диапазон измерения от 13...1000 мкм, точность ± 2 мкм + 3 % от показания. Есть модификации для многослойных покрытий до 3-х слоев.



Толщиномер ТТ210. Универсальный толщиномер покрытий на магнитном и немагнитном основаниях. Диапазон 0...1250 мкм, память на 500 измерений, погрешность ± 3 %. Внесен в ГРСИ.

Цифровой толщиномер покрытий ТТ-230. Толщиномер неэлектропроводящих покрытий (лак, краска, эмаль и т. д.) на НЕмагнитном основании (медь, алюминий, цинк и т.д.) вихретоковым методом. Диапазон 0...1250 мкм. Погрешность: ± 3 %. Минимальный размер объекта контроля: диаметр — 5 мм, толщина — 0,3 мм. Внесен в ГРСИ.

ТЕПЛОВИЗОРЫ Testo 880

Российское отделение ведущего производителя портативного измерительного оборудования **Testo AG — ООО «Тэсто Рус»** — представляет новинку — **тепловизоры Testo 880.**

Это передовые технологии в новом ценовом измерении, которые по соотношению цена и функциональность не имеют аналогов. Благодаря высокой температурной чувствительности ($< 0,1^\circ\text{C}$), прибор Testo 880 детально визуализирует повреждения соединений электрических систем и компонентов. Преимущество тепловизора Testo 880: высококачественный широкоугольный 32° объектив с оптикой F1, опционный сменный телеобъектив, запатентованный фильтр для защиты объектива, детектор 160×120 с интерполяцией изображения до 320×240 пикселей, минимальное фокусное расстояние 10 см.

Встроенная цифровая камера и мощная LED подсветка позволяют в дополнение к тепловизионному снимку получить реальную фотографию объекта тепловизионного контроля и интег-



рировать ее в тепловизионный отчет. Программное обеспечение, входящее в комплект поставки, предлагает широкие возможности по обработке тепловых снимков. Данные о температуре объекта по 10-ти точкам, настройка температурной шкалы, коррекция коэффициента излучения и отраженной температуры, построение изотерм и гистограмм, смена цветовой палитры — вот далеко не полный перечень функциональных возможностей программного обеспечения testo IR-soft.



УДК 621.129.14

ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

А. Я. НЕДОСЕКА, С. А. НЕДОСЕКА, О. И. БОЙЧУК, С. А. КУШНИРЕНКО,
М. А. ЯРЕМЕНКО, А. Ю. ФЕДЧУН, А. А. ЕЛКИН, Б. М. ОБОДОВСКИЙ

Рассмотрены два случая возникновения температурных напряжений в трубе с нарушенной теплоизоляцией. Показано, что даже в трубе с толщиной стенки средней величины возникает объемное напряженное состояние с переменными во времени температурными напряжениями. Цикличность их изменения способствует перемещению и росту внутренних дефектов в материале.

The paper deals with two cases of development of temperature stresses in a pipe with damaged thermal insulation. It is shown that a bulk stressed state with temperature stresses variable in time develops even in a pipe with a medium wall thickness. The cyclic nature of their variation promotes displacement and growth of inner defects in the material.

Технологические трубопроводы, работающие при высоких (до 500 °С) температурах, рассчитываются на длительную прочность и ползучесть с учетом действующего напряженного состояния, вызванного внутренним давлением рабочего вещества. При этом предполагают, что температурный режим стабилен и обеспечивается специальными конструкционными решениями, включая качественную наружную изоляцию трубы. Однако с течением времени изоляционное покрытие труб может быть нарушено и наружная стенка трубы будет подвержена действию нестационарного воздушного потока, степень воздействия которого будет зависеть от места расположения трубопровода и интенсивности движения воздушных потоков в месте нарушения целостности тепловой изоляции (рис. 1). Если учесть, что материал труб находится также в условиях протекающих общих коррозионных процессов, газовой коррозии, действие которых усиливается переменными напряжениями, становится ясно, что вопросы минимизации напряженного состояния материалов труб достаточно актуальны.

В данной статье показано, как влияет нарушение изоляции трубопроводов на возникновение в трубе дополнительных напряжений, снижающих эксплуатационные возможности трубы. При нарушении в процессе эксплуатации термоизоляции появляется дополнительный теплоотвод с поверхности трубы в месте нарушения изоляции и возникает, как следствие, переменное по толщине трубы температурное поле, появляются дополнительные, иногда значительные, температурные напряжения. Возникшие напряжения складываются с напряжениями действующими от внешней нагрузки и могут привести к нарушению режима работы трубы и связанного с ней оборудования.

Для оценки влияния нарушения теплоизоляции на температурное поле технологических трубопроводов были проведены специальные эксперименты на реальных конструкциях, где в отдельных местах была специально нарушена конструкция изоляционного покрытия. Эксперименты показали, что температура на наружной поверхности изоляционного покрытия ощутимо повышается в зависимости от степени его нарушения. На рис. 2 в правой части показана шкала прибора, настроенная в данном случае в диапазоне от 46 до 237 °С. Выше шкалы приведена температура изоляции трубы 60,9 и 121 °С (крестики с цифрой 1) в выбранном оператором месте. Так, при температуре внутренней стенки трубы 475 °С температура на

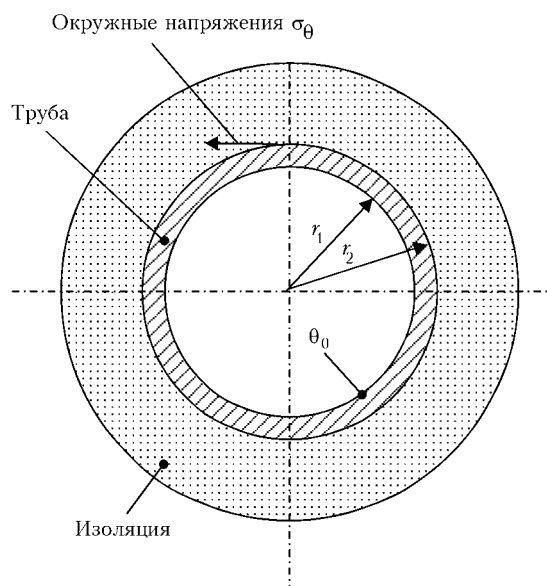


Рис. 1. Поперечное сечение цилиндрического технологического трубопровода с теплоизоляцией (ось z направлена перпендикулярно плоскости чертежа)



наружной поверхности изоляции может достигать величины от 60 до 120 °С. Таким образом, температура наружной стенки трубы при нарушении теплоизоляции становится ниже температуры ее внутренней стенки, что, как было сказано выше, приводит к искажению температурного поля в трубе и, как следствие, к появлению температурных напряжений.

Учитывая сложность измерения температуры наружной стенки трубы без нарушения теплоизоляционного слоя, распределение температуры в ней изучали путем аналитического моделирования с учетом проделанных экспериментальных измерений. При этом сток тепла с наружной поверхности трубы задавался либо на основании данных эксперимента по коэффициенту теплоотдачи для подобных условий, либо путем введения функции стока тепла, близкого по своему действию к данным проведенных экспериментов.

Рассмотрим цилиндрическую протяженную трубу (рис. 1) из стали А335-Р11 с пределом прочности 413 МПа, пределом текучести 207 МПа, содержащей до 1,25 % хрома и 0,5 % молибдена, вырезанную из трубопровода перегретого пара, находящийся под воздействием неравномерного температурного поля. Эту задачу теплопроводности можно разбить на две части — первая часть представляет случай, когда теплоотводящие потоки незначительно изменяются во времени и температурное поле успевает приобрести стационарный характер. Вторая — случай, когда потоки теплоотвода меняются достаточно интенсивно и процесс становится нестационарным. Рассмотрим вначале более простой случай, когда труба находится под воздействием плоского осесимметричного температурного воздействия. Температурное поле θ_n в этом случае может быть рассчитано с использованием дифференциального уравнения стационарной температурной задачи в полярных координатах:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} = 0, \quad \theta = \theta_0 \left[1 - \frac{\frac{\alpha}{\lambda} r_2 \ln(r/r_1)}{1 + \frac{\alpha}{\lambda} r_2 \ln(r_2/r_1)} \right],$$

$$\theta = \theta_0 [1 + k \ln(r/r_1)], \quad (1)$$

при граничных условиях:

$$\lambda \frac{\partial \theta}{\partial r} = \alpha \theta \quad \text{при } r = r_2,$$

$$\theta = \theta_0 \quad \text{при } r = r_1,$$

где $k = \frac{\alpha r_2}{\lambda} \frac{1}{1 + \frac{\alpha r_2}{\lambda} \ln(r_2/r_1)}$; θ — текущее значение температуры в стенке элемента трубы, К; α —

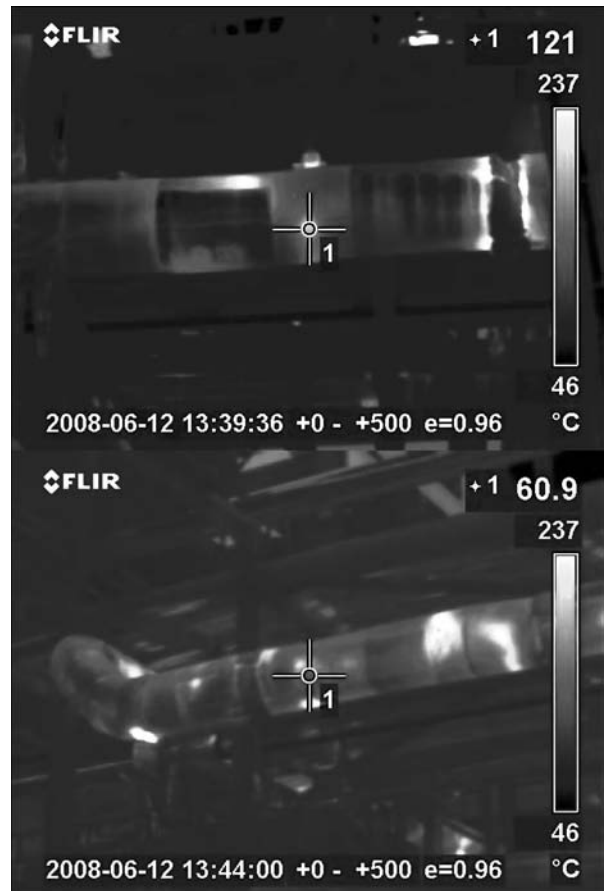


Рис. 2. Типичное в инфракрасном свете распределение температуры в элементах трубопроводов с нарушенной теплоизоляцией

коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С); θ_0 — температура внутренней стенки трубы (рабочего вещества), °С (К); r_1, r_2 — внутренний и наружный радиусы трубы, см (м).

Значения коэффициентов теплоотдачи α для труб без теплоизоляции при различных условиях отвода тепла с наружной поверхности приведены ниже [6, 10], Вт/(м²·К): неподвижный воздух — 12,6...21; незначительное перемещение воздуха — 42; сильное порывистое движение воздуха — 210.

С учетом значений коэффициентов теплоотдачи построены графики распределения температуры по толщине стенки элемента трубы (рис. 3, 4). Из графиков видно, что штатная ненарушенная изоляция трубы и изоляция с незначительным пропусканием тепла наружу $\alpha = 2,1$ Вт/(м²·К) обеспечивают практически равномерную температуру по толщине стенки трубы. Незначительные потери тепла приводят к изменению температуры на наружной стенке трубы приблизительно на 20 °С. Увеличение интенсивности теплоотвода за счет существенного нарушения изоляции приводит к большему понижению температуры на наружной стенке трубы (оголенная труба и наличие охлаждения разной интенсивности). При этом температура



наружной стенки трубы может понизиться до 140 °С (интенсивный теплоотвод с $\alpha = 210$ Вт/(м²·К)). Ниже будет показано, что такое глубокое понижение температуры приводит к появлению больших температурных напряжений.

Рассмотрим влияние нарушения теплоизоляции трубы на величину возникающих в ней температурных напряжений. Температурные напряжения в трубе в этом случае могут быть рассчитаны, исходя из следующего дифференциального уравнения [10]:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} - \frac{\varphi}{r^2} = -\alpha_1 E \frac{\partial \theta}{\partial r}. \quad (2)$$

Решая уравнение (2), переходим к следующим общим формулам:

$$\sigma_r = -\frac{E}{r^2} \left(\int (\alpha_1 \theta) r dr \right) + \frac{C_1}{2} + \frac{C_2}{r^2},$$

$$\sigma_\theta = E \left(-(\alpha_1 \theta) + \frac{1}{r^2} \int (\alpha_1 \theta) r dr \right) + \frac{C_1}{2} - \frac{C_2}{r^2}. \quad (3)$$

После подстановки значений постоянных C_1 , C_2 и стационарного температурного поля (1) получим:

$$\sigma_r = \frac{\alpha_1 E \theta_0 k}{2} \left[\ln \left(\frac{r}{r_1} \right) - \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \frac{r_2^2}{r^2} \frac{r^2 - r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \right], \quad (4)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\alpha_1 E \theta_0 k}{2} \left[1 + \ln \left(\frac{r}{r_1} \right) - \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \frac{r_2^2}{r^2} \frac{r^2 - r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \right]. \quad (5)$$

Графики температурных окружных напряжений, рассчитанные по формулам (4) и (5) для трубы диаметром 508 мм с толщиной стенки 38,1 мм, при различных условиях отвода тепла приведены на рис. 3.

Учитывая, что труба имеет большие размеры вдоль оси z , и ее деформация в этом направлении $\varepsilon_z + \alpha \theta$ должна быть равна нулю, появится составляющая напряжений σ_z , равная $\nu(\sigma_r + \sigma_\theta)$. На рис. 5 напряжения σ_z для $\alpha = 210$ Вт/(м²·К) показаны пунктиром.

Показанные на графиках напряжения и температуры представляют, как было сказано, стационарный вариант теплоотвода, когда было достаточно времени, чтобы в результате изменения условий теплоотвода температурный режим в трубе приобрел стационарный характер на новом уровне. Для исследования влияния нестационарного процесса изменения температуры на характер распределения напряжений в трубе необходимо рассмотреть более общий случай, когда температура зависит не только от координаты r , но и от вре-

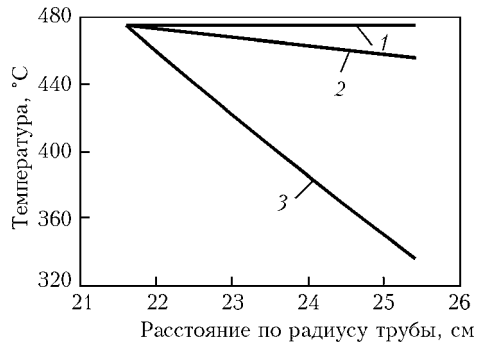


Рис. 3. Распределение температуры в стенке трубы 508×38,1 мм при различных условиях теплоотвода, Вт/(м²·К): 1 — 2,1; 2 — 21; 3 — 210

мени t . Дифференциальное уравнение в этом случае принимает вид [10]:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} - \frac{1}{a} \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{Q}{2\pi\lambda r b} \delta^+(r - r_3) \delta^+(t), \quad (6)$$

где Q — энергия стока тепла с наружной поверхности стенки трубы в окружающую среду, Дж (кал); $a = \lambda/c\rho$ — коэффициент температуропроводности, м²/с (см²/с); c — удельная теплоемкость, Дж/(кг·К) (кал/г °С); ρ — плотность материала, т/м³ (г/см³); b — ширина вырезанного кольца, принятая равной 1 см; r_3 — фиктивный радиус окружности, где приложен интенсивный сток тепла, который определяется из первого граничного условия на боковых поверхностях трубы: $\partial\theta/\partial r = \alpha\theta$ при $r = r_2$; $\theta = 0$ при $r = r_1$; начальные условия: $\theta = 0$ при $t = 0$.

Решаем уравнение (6) методом интегральных преобразований, предполагая, что отвод тепла осуществляется с диска бесконечных размеров на окружности радиуса r_3 . Возвращение к трубе конечных размеров осуществим граничными условиями для радиальных напряжений ($\sigma_r = 0$ на границе r_1 и r_2 , см. рис. 1). Выражение для расчета температуры θ после прямых и обратных преобразований Лапласа и Ханкеля примет вид:

$$\theta = -\frac{Qa}{2\pi\lambda} \int_0^\infty \alpha J_0(\alpha r) J_0(\alpha r_3) \exp(-\alpha^2 a t) d\alpha, \quad (7)$$

где J_0 — функции Бесселя первого рода нулевого порядка от действительного аргумента; α — параметр преобразования Ханкеля.

Решая интеграл (7), получаем:

$$\theta = -\frac{Q}{4\pi\lambda b t} \exp\left(-\frac{r^2 + r_3^2}{4at}\right) I_0\left(\frac{r r_3}{2at}\right), \quad (8)$$

где I_0 — функция Бесселя первого рода нулевого порядка от мнимого аргумента.

Температуры, рассчитанные по этой формуле, приведены на графиках рис. 6 (при расчете

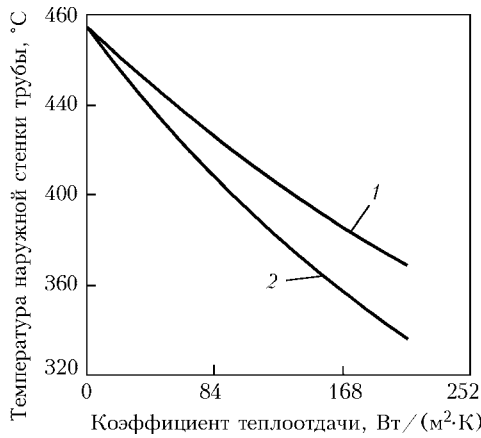


Рис. 4. Влияние интенсивности теплоотвода на температуру наружной стенки труб двух диаметров, мм: 1 — 273×21,4; 2 — 508×38,1

энергии стока тепла с наружной поверхности трубы коэффициент теплоотдачи принимался равным $\alpha = 10^4$ Вт/(м²·К). Тогда $Q = 4399,3$ Дж, где t_0 — время действия стока тепла, принятое равным 1 с; $b = 10^{-2}$ м. Для хромоникелевых сталей $a = 4 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $\lambda = 21,0$ Вт/(м·К); $\alpha_T = 11 \cdot 10^{-6}$ 1/К; $E = 2 \cdot 10^5$ МПа). Как видно из графиков, распределение температуры в трубе существенно зависит от времени, прошедшего с момента прекращения действия мгновенного стока тепла. В первые моменты времени распределение температуры по толщине стенки трубы имеет большой градиент. В следующие моменты крутизна распределения становится меньше, графики более пологие. Наложение кривых распределения температуры, показанных на графиках рис. 4, на графики рис. 3 даст распределение температур в общем

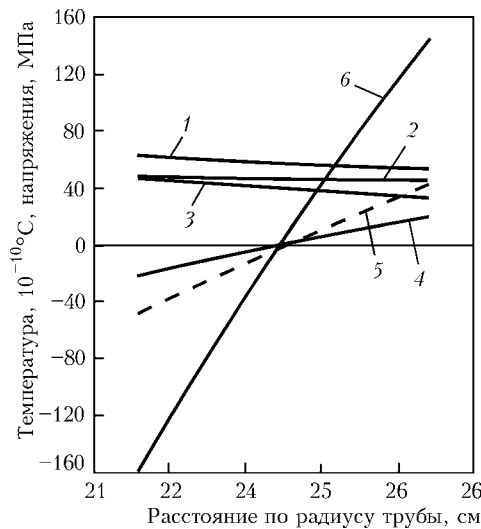


Рис. 5. Распределение температуры и окружающих температурных напряжений в стенке трубы 508×38,1 мм без изоляции при различных условиях теплоотвода, Вт/(м²·К): I — $\alpha = 21$; II — $\alpha = 210$ (кривые 2, 3 — соответственно температура при условиях I, II; 4, 6 — соответственно напряжения при условиях I, II; 1, 5 — соответственно напряжения от внутреннего давления и вдоль оси z при условии II)

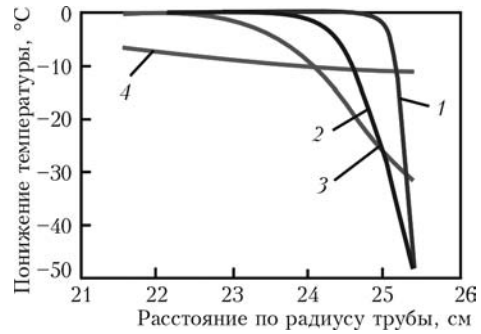


Рис. 6. Понижение температуры стенки трубы 508×38,1 мм, вызванное мгновенным интенсивным (10^4 Вт/(м²·К)) стоком тепла с ее наружной поверхности спустя 1...180 с с момента прекращения действия стока, с: 1 — 1; 2 — 5; 3 — 15; 4 — 180

случае действия обоих стоков — стационарного и переменного во времени.

Воспользуемся, как и ранее, выражениями (3) и (6) для расчета напряженного состояния в трубе в случае действия порывов ветра, дождя и снега на ее оголенную наружную поверхность. Определив произвольные постоянные C_1 и C_2 в выражениях (3) из условий равенства нулю напряжений σ_r на внутренней и наружной стенках трубы, получим следующие значения постоянных и формулы для расчета напряжений σ_r и σ_θ :

$$C_2 = -\frac{\alpha_1 E r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \left(\int_{r_1}^{r_2} \theta r dr - \frac{r_2^2 r_1}{r_1^2} \int \theta r dr \right), \quad (9)$$

$$\frac{C_1}{2} = \frac{\alpha_r E}{r_1^2} \left[\left(\int_{r_1}^{r_1} \theta r dr \right) + \frac{r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \left(\int_{r_2}^{r_2} \theta r dr - \frac{r_2^2 r_1}{r_1^2} \int \theta r dr \right) \right].$$

После несложных преобразований и оценки входящих в формулы членов получим выражения для σ_θ и σ_r :

$$\sigma_\theta = -\frac{\alpha_1 E Q a}{2\pi \lambda b} \left[-\frac{\exp\left(\frac{r r_3}{2at} - \frac{r^2 + r_3^2}{4at}\right)}{2at \sqrt{\pi \frac{r r_3}{at}}} + \frac{1}{r^2} \int \theta r dr + \frac{1}{r^2} \left[\frac{r^2 + r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \left(\int_{r_2}^{r_2} \theta r dr - \frac{r_2^2 r_1}{r_1^2} \int \theta r dr \right) + \frac{r_2^2 r_1}{r_1^2} \int \theta r dr \right] \right], \quad (11)$$

$$\sigma_r = \frac{\alpha_1 E Q a}{2\pi \lambda b r^2} \left[-\int \theta r dr + \left(\frac{r^2 - r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \int_{r_2}^{r_2} \theta r dr + \left(\frac{r^2}{r_1^2} - \frac{r_2^2}{r_1^2} \frac{r^2 - r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \right) \int_{r_1}^{r_1} \theta r dr \right) \right], \quad (12)$$

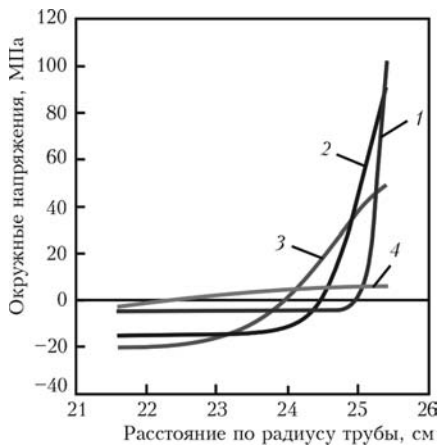


Рис. 7. Окружные напряжения в трубе 508×38,1 мм с поврежденной теплоизоляцией в диапазоне температур от 1 до 180 с после мгновенного приложения интенсивного (10 Вт/(м²·К)) стока тепла, с: 1 — 1; 2 — 5; 3 — 15; 4 — 180

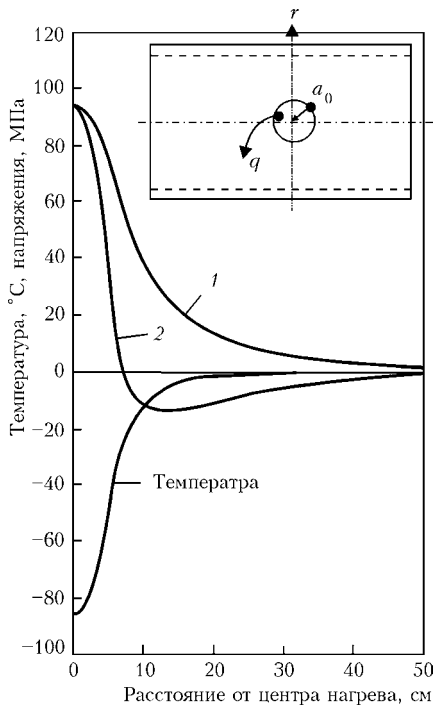


Рис. 8. Радиальные (1) и тангенциальные (2) напряжения на наружной поверхности трубы 508×38,1 мм при стационарном отводе тепла из круга радиусом a_0 наружной поверхности

где r , r_1 и r_2 — значения параметра r в подынтегральной функции правой части формулы (10) (учитываются в выражениях (11, 12) в зависимости от символов над интегралами). Формулы (11, 12) для σ_θ и σ_r достаточно просто реализуются на персональном компьютере.

Температурные напряжения всецело зависят от градиента кривых распределения температуры. Так, на рис. 7 показано распределение напряжений по толщине стенки трубы для четырех моментов времени — от 1 до 180 с с момента прекращения действия мгновенного стока тепла. Видно, что градиент изменения температуры с изменением радиуса трубы с увеличением времени

становится все меньше. Следует также отметить, что, несмотря на сравнительно небольшую толщину стенки трубы в ней возникает объемное напряженное состояние с напряжениями σ_z , составляющими 1/3 по сравнению с окружными σ_θ и напряжениями σ_r , незначительными по своей величине. Малые величины радиальных напряжений объясняются сравнительно небольшой толщиной стенки трубы. Окружные напряжения соизмеримы с напряжениями в стационарном режиме и могут достигать существенной для влияния на несущую способность трубы величины.

Следует отметить, что определенный вес в оценке работоспособности материала трубы приобретает динамика изменения напряжений, возникающих при переменном температурном поле. Практически мы имеем дело с усталостью материала, где цикличность напряжений в трубах с поврежденной теплоизоляцией обеспечивается наличием переменного теплоотвода за счет движения воздушных потоков различной интенсивности, дождя, снега и др. Как и в случае суммарного действия двух факторов — стационарного и переменного во времени стоков тепла с наружной поверхности трубы, общая картина напряженного состояния стенки трубы может быть определена наложением полей напряжений, показанных на рис. 5 на напряжения рис. 7.

В случае местного стока тепла с поверхности трубы в радиусе a_0 главные значения напряжений σ_r могут быть рассчитаны по формулам [11]:

$$\sigma_r = \frac{2\alpha_r q a_0 E}{\lambda \delta r} \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^{\infty} \frac{A_n(z) A_n(z_0) J_1(\alpha a_0) J_1(\alpha r)}{\alpha(\alpha^2 + \gamma_n^2)} d\alpha,$$

$$\sigma_\theta = \frac{2\alpha_r q a_0 E}{\lambda \delta} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n(z) A_n(z_0)}{B_n} \times$$

$$\times \int_0^{\infty} \frac{J_1(\alpha a_0)}{(\alpha^2 + \gamma_n^2)} \left[J_0(\alpha r) - \frac{J_1(\alpha r)}{\alpha r} \right] d\alpha,$$

$$A_n(z) = \delta [\gamma_n \cos(\gamma_n z) + \frac{\alpha_1}{\lambda} \sin(\gamma_n z)],$$

$$B_n = (\gamma_n \delta)^2 + \left(\frac{\alpha_1}{\lambda} \delta\right)^2 + \frac{(\gamma_n \delta)^2 - \left(\frac{\alpha_1}{\lambda} \delta\right)^2}{\gamma_n \delta} \sin(\gamma_n \delta) \cos(\gamma_n \delta) +$$

$$+ 2 \frac{\alpha_1}{\lambda} \delta \sin^2(\gamma_n \delta) \operatorname{ctg}(\gamma_n \delta) = \frac{\lambda \gamma_n}{\alpha_1},$$

где α_1 — теплоотдача с наружной поверхности трубы в месте стока тепла, Вт/(м²·К); q — мощность стока тепла, Вт/м².



Графики распределения окружных напряжений на наружной поверхности трубы представлены на рис. 8. Расчеты выполнены для $q = 4,2 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$; $a_0 = 0,05 \text{ м}$; $\lambda = 21 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; $\alpha_T = 11 \cdot 10^{-6} \text{ 1/К}$; $E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$; $\delta = 0,0381 \text{ м}$.

Выводы

1. Нарушение изоляции в процессе эксплуатации технологических трубопроводов, работающих при высоких температурах, приводит к появлению существенных, дополнительных к рабочим, температурных напряжений, что интенсифицирует процессы накопления повреждений в материале труб и может привести к преждевременному выходу из строя трубопровода за счет возникновения и развития внутренних дефектов в материале и появлению сетки трещин.

2. Мгновенные температурные напряжения, связанные с переменностью во времени температурного поля трубы, по абсолютной величине соизмеримы с напряжениями, возникающими при стационарном случае распределения тепла. Однако опасность их больше и связана с большим влиянием на процессы накопления усталостных повреждений. Отрицательное влияние переменных напряжений проявляется с течением времени, когда ударная вязкость материала трубы будет понижена до критического уровня за счет накопившихся повреждений.

3. Во избежание потери работоспособности материалов труб необходим тщательный контроль состояния их тепловой изоляции.

4. Проведенные исследования обосновывают целесообразность непрерывного мониторинга участков труб и оборудования, работающих в сложных температурных условиях.

1. *Алешин Н. П.* Оценка остаточного ресурса сварных конструкций // Сварка и Диагностика. — 2007. — № 2. — С. 4–10.
2. *Анализ причин аварийности* // Газовая промышленность. — 1989. — № 10. — С. 2–5.
3. *Бабаев А. В.* Влияние остаточных напряжений на зарождение и скорость развития усталостных трещин в свар-

ных соединениях с непроварами // Автомат. сварка. — 1977. — № 12. — С. 30–32.

4. *Березина Т. Г., Бугай Н. В., Трунин И. И.* Диагностирование и прогнозирование долговечности металла теплоэнергетических установок. — Киев: Техника, 1991. — 120 с.
5. *Варовин А. Я., Карзов Ю. Я., Марголин Б. З.* Проблемы прогнозирования работоспособности конструкций по данным НК // В мире неразруш. контроля. — 2006. — 4(34). — С. 6–11.
6. *Вильям Х. Мак-Адамс.* Теплопередача. — Киев: Металлургиздат, 1961. — 385 с.
7. *Акустико-эмиссионный контроль разрушения двухсекционного компенсатора в условиях малоциклового усталости* / В. А. Кобзев, С. А. Белов, М. А. Оразова, Д. Г. Рязов // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2007. — № 2. — С. 51–56.
8. *Оценка состояния металла труб после длительной эксплуатации в системе магистральных газопроводов* / А. А. Лебедев, С. А. Недосека, Н. Р. Музыка, Н. Л. Волчек // Там же. — 2003. — № 2. — С. 3–8.
9. *Лебедев А. А., Чаусов Н. Г.* Экспресс-метод оценки трещиностойкости пластичных материалов / АН УССР, Ин-т пробл. прочности, препринт. — Киев, 1988. — 43 с.
10. *Недосека А. Я.* Основы расчета и диагностики сварных конструкций / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: Индпром, 2008. — 815 с.
11. *Недосека С. А.* Прогноз разрушения по данным акустической эмиссии // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2007. — № 2. — С. 3–8.
12. *Obodovsky B., Fedchun A., Prof. Nedoseka.* Application of a Permanent Acoustic Emission Monitoring System on Four Ammonia Storage Tanks // Ammonia Technical Manual. — 2006. — P. 23–32 (доклад на 51 Конференции американских инженеров-химиков по безопасности в аммиачном и связанном с ним производствах. — Ванкувер 11–14 сент.).
13. *Панасюк В. В.* О современных проблемах механики разрушения // Физ.-хим. механика материалов. — 1982. — № 2. — С. 7–27.
14. *Патон Б. Е., Недосека А. Я.* Диагностика и прогнозирование остаточного ресурса сварных конструкций (состояние вопроса и перспективы развития) // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1992. — № 1. — С. 3–15.
15. *Стрижало В. А., Гришко А. П., Стрельченко В. А.* Диагностика повреждений и прогнозирования предельного состояния конструкций методом акустической эмиссии // Диагностика и прогнозирование разрушения сварных конструкций. — 1986. — № 3. — С. 54–59.
16. *Влияние предварительного циклического нагружения на процесс разрушения образцов из мартенситностареющей стали при статическом растяжении* / Н. Г. Чаусов, А. А. Лебедев, И. О. Богинич и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1996. — № 3. — С. 32–39.
17. *Чаусов Н. Г., Недосека С. А., Пилипенко А. П.* Комплексная оценка поврежденности пластичных материалов при различных режимах нагружения // Там же. — 2004. — № 3. — С. 16–21.



ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ТРУБОПРОВОД ПО АНАЛИЗУ ЭПЮР РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОДОЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

С. К. ФОМИЧЕВ, С. Н. МИНАКОВ, С. В. МИХАЛКО, М. А. ЯРЕМЕНКО, А. С. МИНАКОВ

Предпринята попытка проанализировать механизмы силового воздействия на трубопровод путем разложения эпюры продольных напряжений на постоянную и переменные составляющие. Такое разложение дает представление о процессах осевого (постоянная составляющая) и изгибающего воздействий (переменная составляющая). Наличие осевого воздействия определяется по неравенству продольных напряжений 0,3 от кольцевых, что согласуется с теорией упругости. На практике по результатам мониторинга этих процессов можно судить о конкретных воздействиях на трубопровод и принять обоснованные технологические решения.

An attempt is made to analyze the mechanisms of force impact on the pipeline by decomposition of the epure of longitudinal stresses into the constant and variable components. Such decomposition gives an idea of the processes of axial impact (constant component) and bending impact (variable component). Presence of axial impact is determined by the inequality of longitudinal stresses of 0.3 of the circumferential stresses, which is in agreement with the theory of elasticity. In practice the results of monitoring these processes provide an estimate of the specific impacts on the pipeline and allow taking substantiated technology decisions.

Украина имеет разветвленную сеть газо-, нефте-, продуктопроводов и является транзитной страной. Учитывая, что срок эксплуатации этих сооружений составляет 30...55 лет, проблема обеспечения безаварийной работы принимает все более важное значение. Одной из задач решения указанной проблемы является мониторинг напряженного состояния магистральных трубопроводов.

Кроме постоянных, временных длительных, кратковременных нагрузок в результате деформаций земной поверхности трубопровод начинает испытывать особые нагрузки [1], учесть которые на этапе проектирования не всегда представляется возможным. По прошествии десятков лет эти процессы могут принимать непредсказуемый характер, поэтому важное значение имеет мониторинг напряженного состояния магистральных трубопроводов, а также оценка силовых воздействий на трубопровод. Воздействие на трубопровод указанных нагрузок выражается в появлении дополнительных продольных напряжений σ_m . Внутреннее давление вызывает не только кольцевые напряжения σ_r , но и продольные σ_m , зависящие от положения оси трубопровода и влияния на него окружающей среды. Подземные магистральные трубопроводы заземлены в грунте и не могут перемещаться в продольном направлении, поэтому при расчете трубопроводы можно рассматривать как заземленные. В связи с этим наряду с кольцевыми напряжениями внутреннее давление вызывает также продольные растягивающие напряжения, которые равны $\mu\sigma_r$, где μ — коэффициент Пуассона, равный 0,3. В непосредственной бли-

зости от резких поворотов трубопроводов на очень ограниченных участках продольные напряжения от внутреннего давления могут достигать значений, составляющих 50 % кольцевых напряжений [2].

Системы мониторинга напряженного состояния трубопроводов [3, 4] позволяют отслеживать реальные значения продольных σ_m напряжений. Измерение напряженного состояния трубопровода проводится в выбранных сечениях. Преобразователи устанавливаются симметрично в одном сечении. Измеренные значения напряжений поступают в головной офис организации, которая эксплуатирует трубопровод [3]. Анализ полученных данных требует от персонала соответствующей квалификации и опыта, который зачастую отсутствует. Специалисты по полученным данным напряженного состояния принимают технологические решения, направленные на обеспечение безаварийной работы, поэтому необходимо знать какие процессы нагружения трубопровода развиваются на конкретном участке. Такому анализу эпюр продольных напряжений трубопроводов для выявления характера их нагружения (осевого или изгибающего) посвящена настоящая работа.

Анализировать данные мониторинга удобно путем построения эпюр продольных напряжений. Рассмотрим прямолинейный участок трубопровода. Для начала в качестве силового воздействия примем только внутреннее давление. Тогда кольцевые напряжения σ_r определяются по формуле Лапласа, а продольные — по формулам

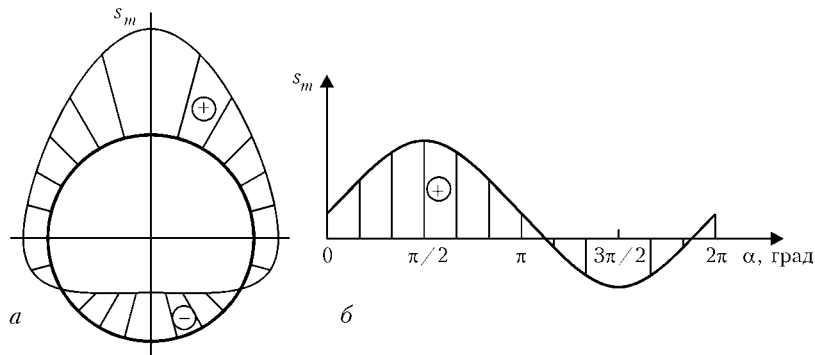


Рис. 1. Эпюра продольных напряжений от внутреннего давления и изгиба в полярных (а) и декартовых (б) координатах

$$\sigma_m = 0,3\sigma_t \quad (1)$$

Указанная эпюра напряжений изгиба будет уравновешенной, т. е.

$$(\sigma_m - \bar{\sigma}_m)_{\text{ср. ариф}} = 0. \quad (7)$$

Среднее арифметическое продольных напряжений определяется по следующей формуле:

$$\bar{\sigma}_m = \frac{\sum_{i=0}^{2\pi} \sigma_{mi}(\alpha)}{i_{\text{max}}}, \quad (2)$$

Приведенные выше рассуждения будут справедливы и при изгибе трубопровода в двух направлениях.

Анализ максимальных и минимальных $\sigma_{\text{изг}}$ при мониторинге напряженного состояния трубопроводов может дать представление о развитии изгибающих процессов, соответственно анализ $\bar{\sigma}_m$ — о развитии процессов сжатия–растяжения трубопровода. Очевидно, что при

$$\bar{\sigma}_m = 0,3\sigma_t \quad (8)$$

отсюда

$$\bar{\sigma}_m = \sigma_m = 0,3\sigma_t. \quad (3)$$

Для случая, если имеется еще изгибающее воздействие на трубопровод (перемещение грунта, просадки), то к продольным напряжениям от давления добавятся еще напряжения от изгиба:

$$\sigma_m = 0,3\sigma_t + \sigma_{\text{изг}}. \quad (4)$$

растяжения–сжатия трубопровод дополнительно не испытывает, т. е.

$$\sigma_{\text{доп. ос}} = \bar{\sigma}_m - 0,3\sigma_t = 0, \quad (9)$$

На рис. 1 приведены эпюры продольных напряжений от внутреннего давления и изгиба в полярных и декартовых координатах.

Если вновь определить среднее арифметическое продольных напряжений (2), получим

$$\bar{\sigma}_m = 0,3\sigma_t. \quad (5)$$

Вычитая из продольных напряжений среднее арифметическое, получаем эпюру от изгиба (рис. 2).

Таким образом,

$$\sigma_{\text{изг}} = \sigma_m - \bar{\sigma}_m. \quad (6)$$

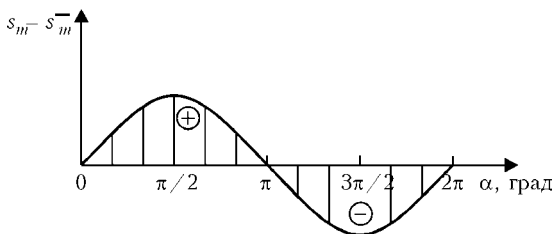


Рис. 2. Эпюра продольных напряжений от внутреннего давления и изгиба в декартовых координатах за вычетом среднего арифметического

где $\sigma_{\text{доп. ос}}$ — дополнительные (кроме составляющей от внутреннего давления) осевые напряжения.

При

$$\sigma_{\text{доп. ос}} \neq 0 \quad (10)$$

трубопровод дополнительно испытывает нагрузки сжатия–растяжения и по изменению значения $\sigma_{\text{доп. ос}}$ можно говорить о тенденции развития процессов осевого нагружения.

Рассмотрим реальный случай перехода трубопровода через овраг.

Схема трубопровода с указанием сечений мониторинга напряженного состояния указана на рис. 3.

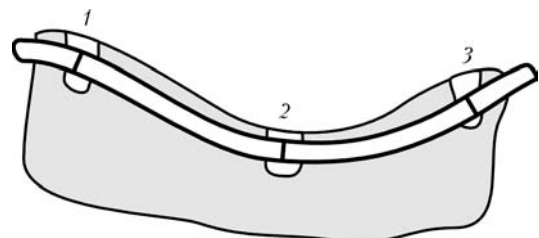


Рис. 3. Схема сечений 1–3 трубопровода для мониторинга напряженного состояния перехода через овраг



Анализ эшюр

Сечение	Напряжение	Угол, град												Напряжения		
		0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	σ_l	$\bar{\sigma}_m$	$\sigma_{доп. ос}$
1	σ_m	83	90	102	117	130	140	145	144	137	125	110	95	159	118	71
	$\sigma_{изг}$	-35	-28	-16	-1	12	22	27	26	19	7	-8	-23	-	-	-
2	σ_m	151	145	125	116	79	54	48	63	96	137	148	150	159	109	62
	$\sigma_{изг}$	42	36	16	7	-30	-55	-61	-46	-13	28	39	41	-	-	-
3	σ_m	84	80	90	112	130	141	144	137	122	103	90	86	159	110	63
	$\sigma_{изг}$	-26	-30	-20	2	20	31	34	27	12	-7	-20	-24	-	-	-

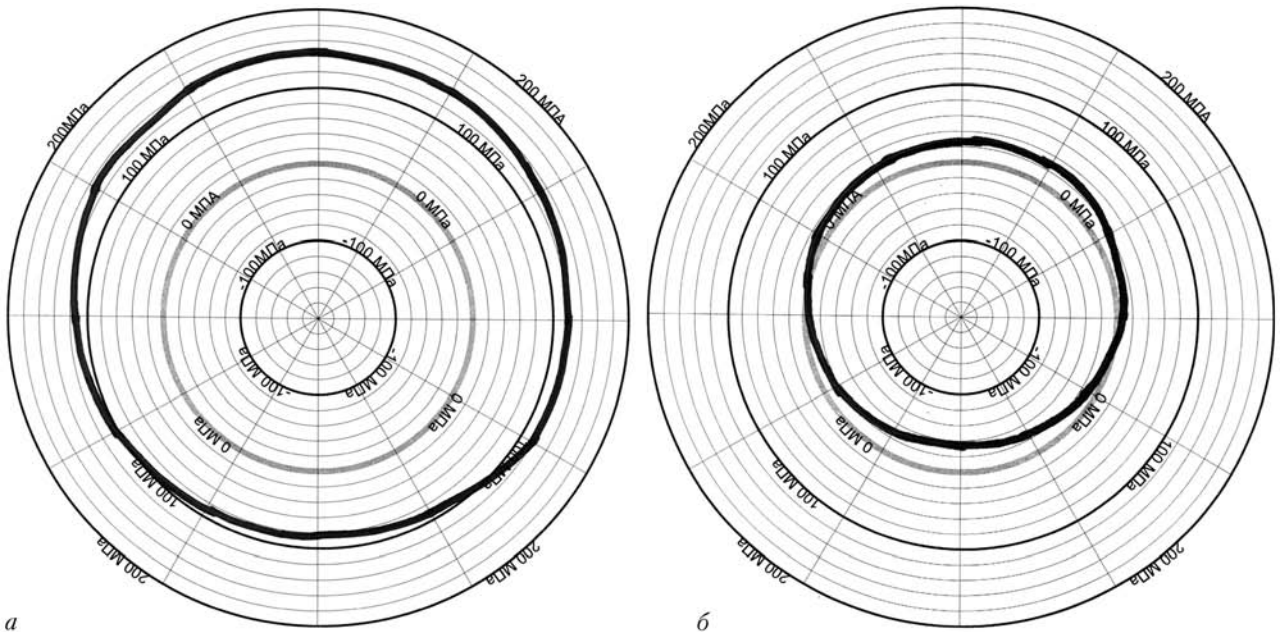


Рис. 4. Эшюры продольных напряжений в сечении 1: а — исходные; б — изгибающие

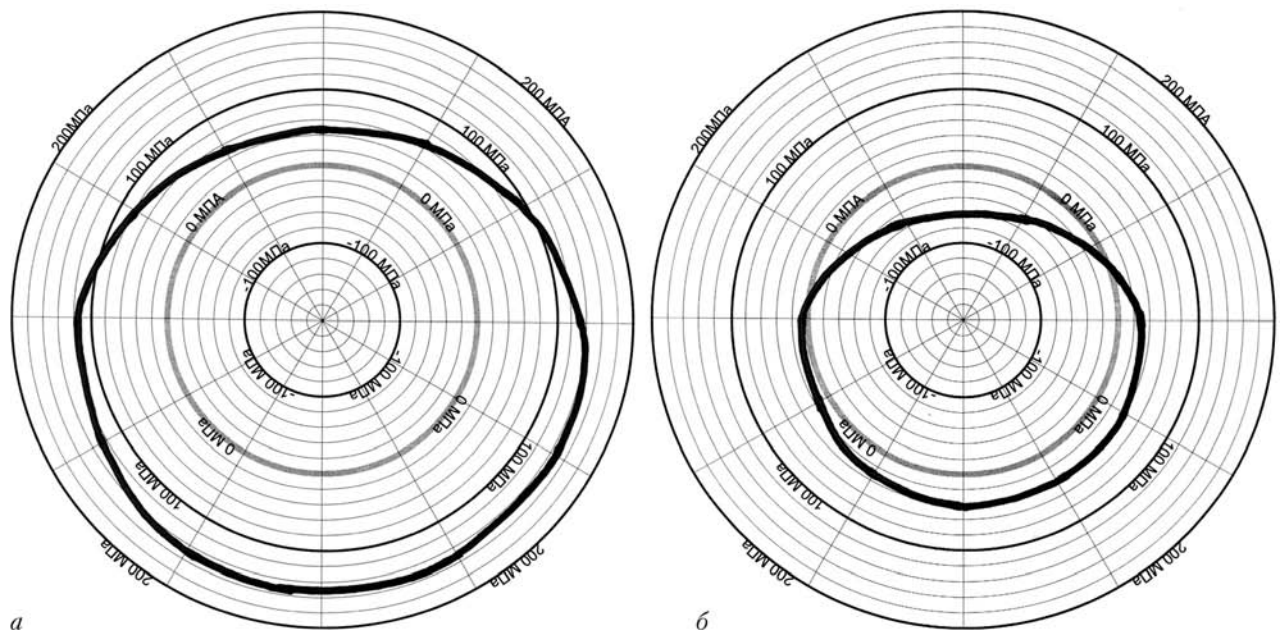


Рис. 5. Эшюры продольных напряжений в сечении 2: а — исходные; б — изгибающие

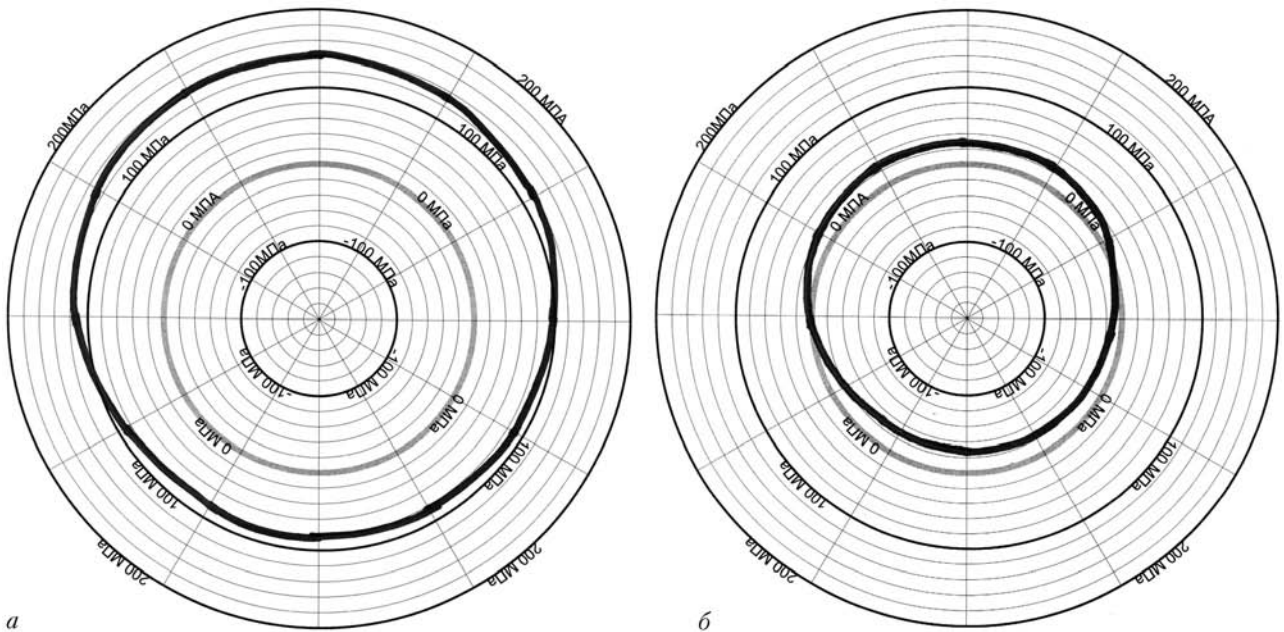


Рис. 6. Эпюры продольных напряжений в сечении 3: а — исходные; б — изгибающие

Анализ эпюр представлен в таблице. Расчет продольных нормальных напряжений проводили по методике, описанной в работе [5]. Рассматривали трубопровод диаметром 356 мм с толщиной стенки 8 мм, находящийся под давлением 7,8 МПа (порядок отсчетов напряжений снизу трубопровода (0°) по часовой стрелке).

Из таблицы видно наличие $\sigma_{\text{доп. ос}}$ порядка 63...71 МПа, которые наиболее вероятно вызваны оползневыми процессами. Соответствующие эпюры продольных нормальных напряжений представлены на рис. 4–6.

Анализ эпюр показывает изгиб трубопровода в сечении 1 и 3 с растягивающими волокнами сверху, на сечении 2 — внизу. Такая схема нагружения трубопровода согласуется с теорией упругости.

Выводы

Для переходов, подверженных циклическим (суточным) тепловым нагрузкам, анализ мониторинга $\sigma_{\text{изг}}$, $\bar{\sigma}$, $\sigma_{\text{доп. ос}}$ позволяет судить о самих нагрузках, а также о работе компенсаторов. Так, наличие в переходе существенной составляющей $\sigma_{\text{доп. ос}}$ свидетельствует о недостаточной работе компенса-

тора, а наличие больших $\sigma_{\text{изг}}$ в компенсаторах — об излишней жесткости последних.

Рассматривая изменения $\sigma_{\text{изг}}$, $\bar{\sigma}$, $\sigma_{\text{доп. ос}}$ во времени, можно представить картину работы участков трубопровода и произведя расчеты на прочность, прогнозировать степень «опасности» таких участков с целью более рационального планирования мероприятий по повышению работоспособности трубопровода.

1. СНиП 2.05.06-85*. Магистральные трубопроводы. — М.: ГУП ЦПП, 1997. — 60 с.
2. Камерштейн А. Г., Рождественский В. В., Ручимский М. Н. Расчет трубопроводов на прочность: Справоч. кн. — М.: Гос. науч.-техн. изд-во нефтян. и горной лит-ры, 1963. — 424 с.
3. Пятиуровневая модульная система мониторинга напряженного состояния трубопроводов, сосудов под давлением, хранилищ, резервуаров магнитоанізотропним методом / С. К. Фомичев, С. Н. Минаков, В. В. Кочубей и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2006. — № 3. — С. 9–15.
4. Автономная система мониторинга механических напряжений магистральных трубопроводов с использованием возможностей GSM связи / С. К. Фомичев, С. Н. Минаков, М. А. Яременко и др. // Там же. — 2008. — № 1. — С. 9–12.
5. Особенности измерения механических напряжений электромагнитным методом в трубопроводах и сосудах давления газового и нефтяного комплекса / А. Я. Недосека, С. К. Фомичев, С. Н. Минаков и др. // Там же. — 1996. — № 1. — С. 55–56.

Нац. техн. ун-т «КПИ»
Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины,
Киев

Поступила в редакцию
23.03.2009



МОДЕЛЬ УЧЕТА ВЛИЯНИЯ СОПУТСТВУЮЩИХ ФАКТОРОВ НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ СЕТИ БАЙЕСА

А. С. БАБИЧЕВ, С. А. БАБИЧЕВ, А. В. ШАРКО

Представлена модель учета влияния сопутствующих факторов на точность акустических измерений, обработка данных в которой осуществляется байесовской сетью. Разработана база данных, на основании которой определяется структура взаимосвязей сети Байеса и априорное вычисление вероятностей значений взаимодействующих факторов. В результате компьютерного моделирования получены вероятностные характеристики сопутствующих факторов при различных значениях относительного изменения скорости ультразвука, что позволяет предсказать характер влияния каждого фактора в отдельности и их совокупного влияния на скорость распространения ультразвука в металле.

The paper presents a model of allowing for the influence of concurrent factors on the accuracy of acoustic measurements, in which data processing is performed by Bayesian network. A data base was developed from which the correlation structure of the Bayesian network is established and a priori calculation of the probabilities of interacting factor values is performed. Computer simulation allowed derivation of probability characteristics of the concurrent factors at different values of relative change of ultrasound velocity, this allowing prediction of the nature of the influence of each factor separately and of their totality on the velocity of ultrasound propagation in the metal.

В настоящее время в различных областях промышленного производства особую актуальность приобретает повышение точности определения механических характеристик металлов методами неразрушающего контроля (НК), что связано с увеличением требований, предъявляемых к действующему промышленному оборудованию. Механические свойства металлов определяются, в первую очередь, технологическими процессами воздействия на металл, а точность их определения — погрешностью измерений, в качестве основных источников которой являются условия контроля, колебания химического состава, колебания размеров изделий, непараллельность поверхностей. Отдельную группу причин, обуславливающих погрешность измерений методами НК, составляют технологические факторы, часто встречающиеся на производстве повторные закалки, закалка и разный отпуск, различное время закалки и отпуска и т. д. Выделение из комплекса таких определяющих факторов и разработка мероприятий по их учету и стабилизации при использовании различных методов контроля составляет одну из основных задач измерительной техники.

Вопросам повышения точности определения механических характеристик металлов посвящено достаточно много работ. В работе [1] авторами определены закономерности влияния структурных факторов на скорость распространения ультразвука в металлах при акустическом методе НК,

представлены результаты экспериментальных исследований по определению изменения скорости ультразвука при различных режимах термической обработки. В работе [2] рассмотрена возможность использования нескольких методов контроля для определения физико-механических характеристик нефтегазового оборудования, проведен сравнительный анализ эффективности использования различных комбинаций методов. В работах [3–5] предложены методы автоматизации процесса контроля состояния исследуемых объектов. Основным недостатком существующих систем технической диагностики является ограниченное использование системного подхода, что способствует повышению погрешности решения поставленной задачи. Учет влияния всех мешающих или воздействующих факторов существенно повышает трудоемкость обработки данных, однако использование современных компьютерных и информационных технологий позволяет получить требуемый результат при минимальных временных затратах на обработку информации.

Целью работы является разработка системы учета влияния технологических факторов на точность определения механических характеристик металлов при использовании акустического метода НК, обработка данных в которой осуществляется сетью Байеса. Выбор сети Байеса определяется вероятностным характером эмпирических данных, получаемых в результате контроля состояния объекта, поэтому установление причинно-следственных закономерностей между техно-



логическими и физико-механическими характеристиками металлов позволит повысить точность определения требуемых механических и прочностных характеристик, что уменьшит вероятность возникновения аварийной ситуации на промышленных предприятиях.

Пусть Ω — выборочное пространство случайных событий, а E и H — две переменные, которые каким-либо образом взаимосвязаны между собой. Если переменная H принимает конкретное значение, то условная вероятность события E , т. е. вероятность, с которой переменная E примет конкретное значение, определяется из выражения:

$$p(E | H_k) = \frac{p(E \cap H_k)}{p(H_k)}. \quad (1)$$

Взаимоисключающие события формируют исчерпывающее множество, если

$$\cup_{i=1}^n E_i = \Omega. \quad (2)$$

Две переменные не пересекаются, если они не имеют одинаковых значений. Теория построения сетей Байеса основывается на предположении, что события являются исчерпывающими и не пересекаются. В этом случае вероятность события E можно вычислить при помощи условных вероятностей:

$$p(E) = \sum_{i=1}^n p(E \cap H_i) = \sum_{i=1}^n p(E | H_i)p(H_i). \quad (3)$$

Используя формулу (1), вероятность пересечения событий E и H можно выразить следующим образом:

$$p(E \cap H_k) = p(E | H_k)p(H_k) = p(H_k | E)p(E), \quad (4)$$

откуда получаем:

$$p(H_k | E) = \frac{p(E | H_k)p(H_k)}{p(E)}. \quad (5)$$

С учетом (3) формулу (5) можно представить так:

$$p(H_k | E) = \frac{p(E | H_k)p(H_k)}{\sum_{i=1}^n p(E | H_i)p(H_i)}. \quad (6)$$

Полученная формула называется формулой Байеса.

Сеть Байеса, формируемая на основании формулы (6), представляет собой направленный ациклический граф, где каждый узел представляет собой переменную, а каждая дуга — вероятностную зависимость, определяемую количественно использованием условного распределения вероят-

ностей для каждого узла. В состав сети Байеса входят следующие компоненты:

- множество узлов, определяющих компоненты системы;
- множество направленных связей между компонентами системы.

Для адекватной работы сети необходимо выполнение следующих условий:

- каждая переменная может принимать только одно из конечного множества взаимоисключающих значений;
- переменные вместе со связями образуют ориентированный граф без циклов;
- каждой переменной потомка A с переменными предками B_1, \dots, B_i приписывается таблица условных вероятностей $P(A/B_1, \dots, B_i)$.

Для проведения исследований использовали следующие факторы, определяющие точность контроля прочностных характеристик акустическим методом технической диагностики:

А. Условия контроля

- S — аппаратная погрешность;
- KS — толщина контактного слоя;
- T — температура окружающей среды.

Б. Размер и материал контролируемого изделия

- Q — добротность колебательной системы;
- NP — непараллельность поверхностей ввода и приема ультразвуковых колебаний;
- HS — химический состав контролируемого металла.

В. Технологические факторы

- T_3 — температура закалки;
- T_o — температура отпуска;
- T_{ay} — температура аустенизации.

В качестве выходной переменной использовали относительную скорость распространения продольной ультразвуковой волны $\Delta v/v$.

Оценка погрешностей условий контроля дана в работе [6]. Аппаратурная погрешность измерения акустических параметров характеризуется среднеквадратичной ошибкой, которую называют среднеквадратичной ошибкой воспроизводимости и определяют по независимым измерениям на одном и том же образце. Общая аппаратурная погрешность является результатом совместного действия ошибки измерений, проведенных на разных установках $S_{уст}$ и ошибки воспроизводимости S_B :

$$S^2 = S_B^2 + n_j S_{уст}^2, \quad (7)$$

где n_j — количество параллельных измерений одной и той же величины на j -й установке.

В эксперименте использовали шесть экспериментальных установок, на каждой из которых было проведено по шесть измерений резонансной частоты одного из пиков амплитудно-частотной зависимости ультразвукового сигнала, прошедше-



го через образец из стали 40X. Расчеты показали, что $S_{уст} = 0,13$ кГц, $S_b = 0,13$ кГц, $S = 0,34$ кГц. Относительное изменение скорости ультразвука составило при этом приблизительно 0,09 %. Анализ результатов эксперимента позволяет дискретизировать диапазон изменений аппаратурной погрешности следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta C}{C} &\leq 0,04 \%, S — \text{низкая (1);} \\ 0,04 \% &< \frac{\Delta C}{C} \leq 0,09 \%, S — \text{средняя (2);} \\ \frac{\Delta C}{C} &> 0,09 \%, S — \text{высокая (3).} \end{aligned} \quad (8)$$

В работе [6] показано, что в случае бесконечно протяженной пластины при небольших колебаниях толщины пластины Δl , вызванных изменением температуры Δt , происходит изменение частоты на величину

$$\Delta f = -f \left[\frac{\Delta l}{l} + (\alpha + \beta) \Delta t \right], \quad (9)$$

где α — коэффициент линейного теплового расширения; β — температурный коэффициент скорости распространения ультразвука материала. Первое слагаемое в квадратных скобках уравнения (9) описывает поправку к частоте, возникающую вследствие отклонения размера изделия от первоначального значения, второе учитывает влияние температуры на изменение размеров изделия и на скорость распространения упругих волн в материале. Согласно теоретическим расчетам по формуле (9) для стали 40X при изменении температуры на 20 °С резонансная частота должна уменьшаться на 5...6 кГц, что составляет приблизительно 3 %. Следует отметить, что теоретические расчеты в пределах допустимой ошибки совпали с результатами экспериментальных исследований.

В работе [7] авторами проведены исследования по оценке влияния нестабильности слоя контактной жидкости в трехслойной системе: пьезопреобразователь, контактная жидкость, изделие. Показано, что наличие контактной жидкости приводит к уменьшению резонансной частоты системы из-за эффекта присоединенной массы пьезоэлемента и прослойки и дополнительного набегга фазы в них. Эксперимент проводили на стальном образце толщиной 90 мм, толщина слоев воды с двух сторон одинаковая и изменяется от 0,1 до 1 мм. Анализ результатов эксперимента показал, что в исследуемом диапазоне толщин частота резонанса отклоняется от среднего не более, чем 0,1 кГц, что составляет приблизительно 0,06 %.

Добротность колебательной системы — это отношение энергии, запасенной в системе, к энергии, теряемой системой за один период колебаний. Величина добротности связана с шириной резонансного пика соотношением

$$Q = \frac{f}{2\Delta f}, \quad (10)$$

где $2\Delta f$ — ширина резонансного пика на уровне 0,7.

Расчеты показали, что отклонение частоты от резонансной на уровне 0,7 вычисляется по формуле:

$$\Delta f = f \frac{2}{n\pi} \frac{|R|}{\mu \sqrt{1 - |R|^2}}. \quad (11)$$

Здесь n — количество длин волн, укладываемых на толщине изделия; R — коэффициент отражения плоской монохроматической ультразвуковой волны от плоского слоя в отсутствии поглощения; μ — отношение волновых сопротивлений образца и контактной жидкости:

$$\mu = \frac{\rho C}{\rho_0 C_0}, \quad (12)$$

где ρ , C и ρ_0 , C_0 — плотность и скорость ультразвука в образце и контактной жидкости соответственно.

Из формулы (11) следует, что чем больше n , тем больше влияние изменения частоты на величину R , т. е. тем острее будет резонансный пик, и, следовательно, тем достовернее можно будет зафиксировать его положение и точнее определить величину резонансной частоты и соответственно скорости ультразвука. Экспериментальные исследования показали, что для образцов длиной 50 мм погрешность резонансной частоты составила 0,1 кГц или 0,06 %, а для образцов длиной 15 мм ошибка определения резонансной частоты не превышала 0,5 кГц или 0,3 %. Исходя из изложенных выше соображений, была принята следующая градация добротности колебательной системы:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta C}{C} &\leq 0,4 \%, Q — \text{высокая (3);} \\ 0,4 \% &< \frac{\Delta C}{C} \leq 1 \%, Q — \text{средняя (2);} \\ \frac{\Delta C}{C} &> 1 \%, Q — \text{низкая (1).} \end{aligned} \quad (13)$$

Оценка погрешности, возникающей вследствие непараллельности поверхностей ввода и приема ультразвуковых колебаний, проведена авторами в работе [7]. В качестве модели использовали цилиндрический резонатор, стенками которого служат две дуги больших радиусов ρ_1 и

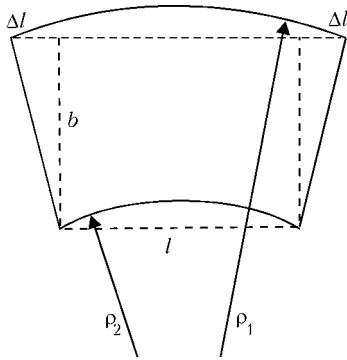


Рис. 1. Форма акустического резонатора, используемая в теоретических расчетах

$\rho_2 = \rho_1 + b$, а боковые торцы образованы отрезками двух радиусов, образующих друг с другом малый угол α (рис. 1). Расчеты показали, что при $l = 25$ мм, $b = 50$ мм, $\Delta l = 0,1$ мм и $f = 2000$ кГц изменение резонансной частоты равно $\Delta f = 2$ кГц или 0,1 %. Анализ экспериментальных данных позволяет оценить качество обработки поверхностей ввода и приема ультразвука следующим образом:

$$\frac{\Delta C}{C} \leq 0,06 \%, NP \text{ — высокая (3);}$$

$$0,06 \% < \frac{\Delta C}{C} \leq 0,12 \%, NP \text{ — средняя (2); (14)}$$

$$\frac{\Delta C}{C} > 0,12 \%, NP \text{ — низкая (1).}$$

Оценка влияния химического состава на точность определения механических характеристик акустическим методом проведена в работе [8]. Авторы исследовали совместное влияние четырех факторов: процентного содержания углерода, хрома, кремния и марганца на величину резонансной частоты образцов из стали 40Х. Методика проведения эксперимента заключалась в следующем: у десяти цилиндрических образцов разных плавок диаметром 22 мм и длиной 90 мм были измерены амплитудно-частотные характеристики, выполнена идентификация одного из характерных резонансных пиков, присущего всем исследованным образцам, и зарегистрирована его частота. Образцы, предназначенные для измерений, подбирали таким образом, чтобы их химический состав максимально перекрывал диапазон возможного для данной марки стали содержания компонентов. Обработку результатов проводили методами математической статистики. В результате экспериментальных исследований было установлено, что максимальное отклонение содержания углерода от своего среднего значения вызывает отклонение резонансной частоты на 0,225, марганца — на 0,235, кремния — на 0,62, хрома — на 0,67 кГц. Величина максимального отклонения резонансной частоты составила при этом $\Delta f_{\max} = 1,52$ кГц, что составляет приблизительно 0,9 %. На основании изложенного выше можно предложить следующую градацию учета влияния химического состава на точность акустических измерений:

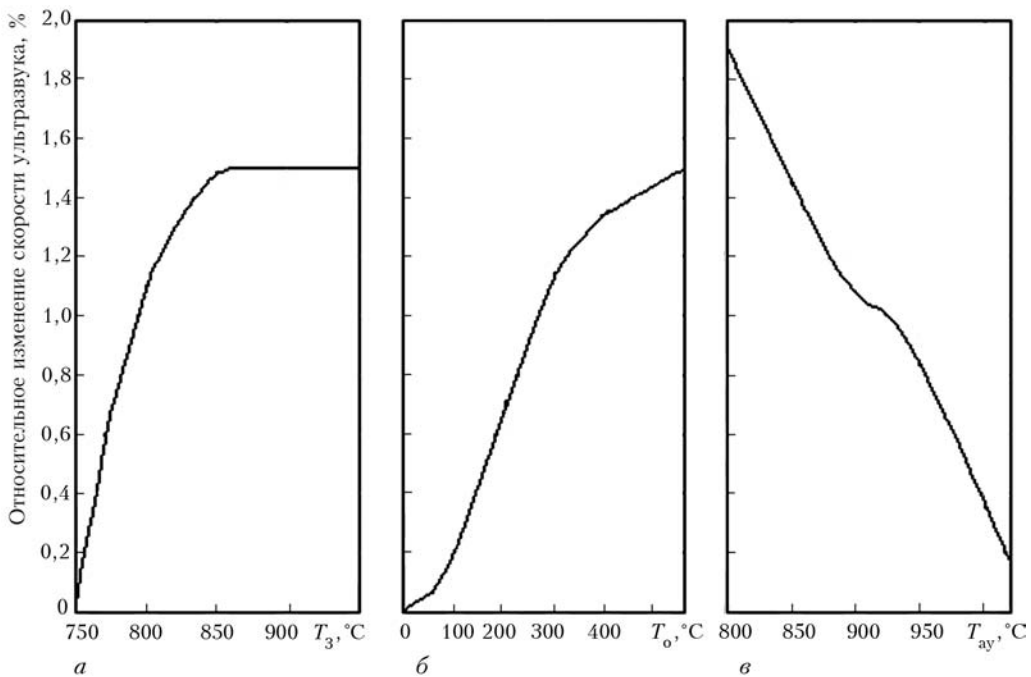


Рис. 2. Графики зависимости относительного изменения скорости ультразвука стали У8А от температуры закалки (отпуск при 550 °С в течение 1 ч) (а), температуры отпуска (б) и температуры аустенизации (в)



$$\frac{\Delta C}{C} \leq 0,32 \%, HS — \text{маленький разброс (1);}$$

$$0,32 \% < \frac{\Delta C}{C} \leq 0,64 \%, HS — \text{средний разброс (2);}$$

$$\frac{\Delta C}{C} > 0,64 \%, HS — \text{высокий разброс (3).} \quad (15)$$

Экспериментальные исследования по учету влияния технологических факторов на точность акустических измерений представлены в работе [1]. Влияние структур, полученных при различных температурах и времени выдержки под закалку, скорости охлаждения, режимах отпуска исследовали на стали У8А. В экспериментах использовали цилиндрические образцы диаметром 14 мм и длиной 25 мм с шероховатостью поверхности 2,5...6,3 мкм. Были выбраны следующие режимы термообработки: закалка от 753 до 953 °С с интервалом 40 °С в течение 0,3 ч с охлаждением в воде комнатной температуры, затем отпуск при 160, 200, 250, 350, 550 °С в течение 1 ч. Измерение скорости ультразвука в образцах определяли резонансным и импульсным методами, при этом измеряли резонансную частоту и рассчитывали относительное изменение частоты, равное относительному изменению скорости распространения ультразвуковых колебаний. За исходную частоту принимали резонансную частоту отожженных образцов. Результаты исследований представлены на рис. 2.

Решение задачи построения сети Байеса проводили с использованием программной среды GeNIe 2.0. Дискретизация переменной — относительное изменение скорости ультразвука $\Delta v/v$ —

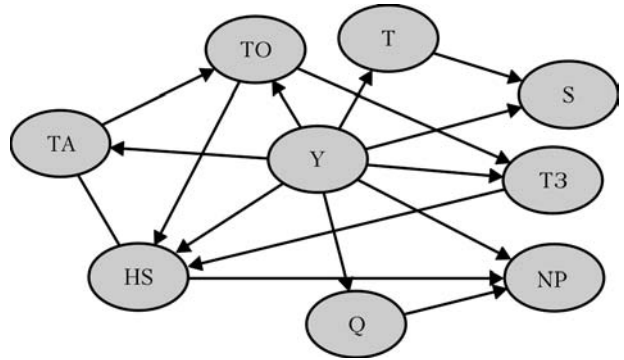


Рис. 3. Структура связей байесовской сети

была проведена следующим образом: $s1 = 0...0,3$; $s2 = 0,31...0,6$; $s3 = 0,61...0,9$; $s4 = 0,91...1,2$; $s5 = 1,21...1,5$. Дискретизацию температур внешней среды, закалки, отпуска и аустенизации проводили путем их разбиения на пять приблизительно равных поддиапазонов.

Для построения структуры связей байесовской сети использовали знания эксперта в данной предметной области. Первоначально был построен граф взаимного влияния размерных и технологических факторов и относительного изменения скорости ультразвука. Затем данный граф был расширен посредством введения экспертом визуальных связей между сопутствующими факторами и относительным изменением скорости ультразвука. Полученная структура байесовской сети представлена на рис. 3.

Распределение вероятностей в построенной сети Байеса при априори заданном значении относительного изменения скорости ультразвука 1 % ($s4$) показано на рис. 4. Распределение вероятностей

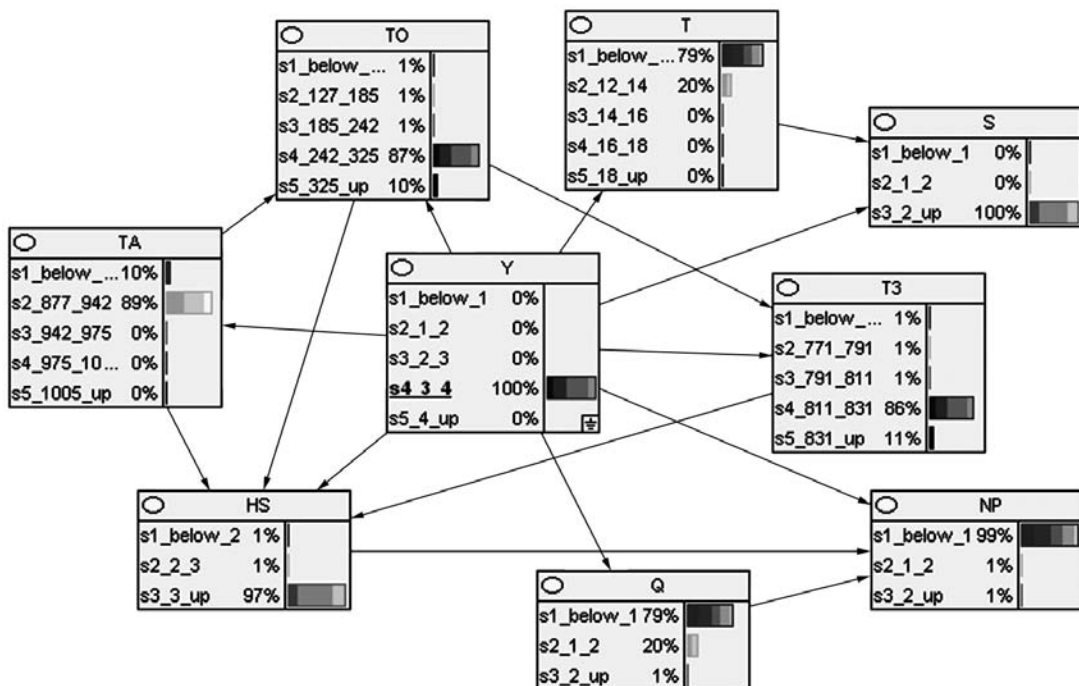


Рис. 4. Распределение вероятностей при заданном значении относительного изменения скорости ультразвука



Распределения вероятностей влияния сопутствующих факторов на относительное изменение скорости ультразвука

Значения	$\Delta v/v = 0...0,3 \%$								$\Delta v/v = 1,21...1,5 \%$							
	S	Q	NP	T	HS	TЗ	ТО	ТА	S	Q	NP	T	HS	TЗ	ТО	ТА
s1	10	1	64	79	88	87	88	0	1	99	99	79	67	1	1	98
s2	17	1	18	20	10	10	9	0	1	1	1	21	23	1	1	0
s3	73	98	18	1	2	1	1	0	99	1	1	0	10	1	1	0
s4	–	–	–	0	–	1	1	1	–	–	–	0	–	1	1	0
s5	–	–	–	0	–	1	1	99	–	–	–	0	–	95	97	0

тей сопутствующих факторов при крайних значениях изменения скорости ультразвука представлено в таблице. Анализ данных таблицы позволяет сделать вывод, что наиболее существенное влияние на относительное изменение скорости ультразвука оказывает добротность колебательной системы, а также режимы термообработки металла. Влияние добротности колебательной системы можно уменьшить за счет более тщательной подготовки исследуемых образцов. Выбор режима термообработки металла во многом определяет его прочностные свойства, поэтому резкое изменение скорости ультразвука при изменении режимов термообработки свидетельствует о высокой чувствительности акустического метода НК к изменению прочностных характеристик металлов.

Выводы

Представлена модель учета влияния размерных и технологических факторов на относительное изменение скорости ультразвука на основе сети Байеса. Создана база данных, включающая взаимосвязанные размерные и технологические факторы и относительное изменение скорости распространения ультразвука в стали У8А. Показана перспективность использования байесовской сети при оценке весового вклада каждого фактора в процесс изменения акустических характеристик, что позволяет определить пути повышения точности измерения прочностных характеристик акустическим методом НК. Рассмотрена методика построения байесовской сети на основе дискретных данных. В результате компьютерного моделирования получены вероятностные характеристики сопутствующих факторов при различных значениях относительного изменения скорости ультразву-

вука, что позволяет предсказать характер влияния каждого фактора в отдельности и их совокупного влияния на скорость распространения ультразвука в металле.

В дальнейшем планируется исследование более детальных соотношений физико-механических характеристик металлов с использованием многокритериального анализа и современных компьютерных методов обработки многомерной информации.

1. Муравьев В. В., Зуев Л. Б., Комаров К. Л. Скорость звука и структура сталей и сплавов. — Новосибирск: Наука, 1996. — 180 с.
2. Карнаш М. О., Кісіль І. С., Карнаш О. М., Молодецький І. А. Застосування комплексного підходу до визначення фізико-механічних характеристик нафтогазового обладнання // Техн. діагностика і неразруш. контроль. — 2006. — № 2. — С. 49–52.
3. Автоматизированная система диагностики промышленного оборудования / А. Ю. Варфоломеев, А. В. Микулович, В. И. Микулович, В. Т. Шнитко // Там же. — 2006. — № 4. — С. 8–14.
4. Бабичев С. А. Разработка автоматизированной системы технической диагностики прочностных характеристик металлов // Вестн. Херсон. гос. техн. ун-та. — 2003. — № 18. — С. 154–162.
5. Бабичев С. А., Литвиненко В. И., Шарко А. В. Автоматизированная система технической диагностики прочностных характеристик металлов на основе гибридных нейронных сетей // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2004. — № 4. — С. 5–10.
6. Левитан Л. Я., Храпцов Г. И., Шарко А. В. К вопросу о погрешности измерений механических свойств металлов ультразвуковым методом // ВИНТИ, рег. № 1970–76. — 1976. — 20 с.
7. Ботаки А. А., Ульянов В. Л., Шарко А. В. Ультразвуковой контроль прочностных свойств конструкционных материалов. — М.: Машиностроение, 1983. — 179 с.
8. Лебедев А. А., Левитан Л. Я., Шарко А. В. Оценка влияния химического состава на результаты измерений механических свойств стали 40Х акустическим методом // Дефектоскопия. — 1979. — № 3. — С. 107–109.



МАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ СВАРНЫХ БАЛЛОНОВ

Л. М. ЛОБАНОВ, В. А. НЕХОТЯЩИЙ, М. Д. РАБКИНА

Приведены результаты систематических исследований коэрцитивной силы H_c и текстуры металла при изготовлении баллонов из высокопрочной стали 30ХГСА. Показано, что для оперативного подбора режимов сварки и термообработки ответственных сварных конструкций целесообразно, наряду с применением традиционных физико-механических методов, на протяжении всей технологической цепочки получения готового изделия применение неразрушающих методов контроля, в том числе основанных на магнитных свойствах стали.

The paper presents the results of systematic studies of coercive force H_c and metal texture in manufacture of cylinders from 30KhGSA high-strength steel. It is shown that for a fast selection of welding and heat treatment modes for critical welded structures it is rational, in addition to application of the traditional physico-mechanical methods, to apply the non-destructive control methods, including those based on the magnetic properties of steel, during the entire technological sequence of manufacturing the finished product.

Промышленный выпуск облегченных сварных баллонов высокого давления из высокопрочных среднелегированных сталей обеспечивается современными технологиями [1, 2]. Однако при производстве небольших партий штамповочных тонкостенных конструкций, где их применение экономически нецелесообразно, возникают условия, требующие, во избежание трещинообразования, специальных технологических приемов.

Целью работы является совершенствование процесса изготовления баллонов, предназначенных для хранения энергоносителей при давлении 15 МПа, с использованием метода магнитного контроля.

Исходным материалом служили термообработанные листы толщиной 2,5 мм из стали 30ХГСА следующего химического состава, мас. %: 0,31 С; 0,97 Mn; 1,07 Si; 0,01 S; 0,017 P; 0,08 Ni; 0,1 Cu; 0,99 Cr; 0,02 V; 0,03 Mo; 0,005 Ti. Механические характеристики гарантировались сертификатом качества (табл. 1), несмотря на то, что эта сталь склонна к образованию холодных трещин [3]. При этом достаточно высокие значения пластичности металла в состоянии поставки должны были обеспечить приемлемую обрабатываемость листов в процессе изготовления баллонов.

Металлографическим анализом основного металла установлено, что его структура представляет собой ферритно-бейнитную смесь со следами полосчатости в приповерхностных сечениях, характерной особенностью которых являются обезуглероженные зоны, чему, по всей вероятности,

способствует повышенное содержание кремния (> 1 %). Микротвердость в этих зонах в 1,7 раза ниже по сравнению с микротвердостью срединных сечений. Местами обезуглероживание распространяется на глубину до 200 мкм (рис. 1). Поскольку в этих зонах были обнаружены микрорасслоения, представляло интерес определить кристаллографическую ориентацию в листе, так как характер текстуры металла обуславливает возможность развития в нем подобных дефектов [4, 5].

Результаты исследования текстуры листа методом построения обратных полюсных фигур показали, что в исходном состоянии в металле сформировалась типичная текстура прокатки, характерная для металлов и сплавов с ОЦК-решеткой, которая описывается как $\{001\}\langle 110\rangle$ (основная компонента) и $\{112\}\langle 110\rangle + \{111\}\langle 110\rangle$ (дополнительные компоненты) (рис. 2, табл. 2). Это означает, что параллельно плоскости прокатки располагаются кристаллографические плоскости семейства $\{001\}$, $\{112\}$ и $\{111\}$ с направлениями $\langle 110\rangle$, лежащими в этих плоскостях и параллельными направлению прокатки. Интенсивность описанной текстуры увеличивается при приближении к середине толщины листа (рис. 2, б). Так,

Таблица 1. Механические свойства стали 30ХГСА

Документ	Состояние материала	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %
30ХГСА ГОСТ 4543	Закалка плюс отпуск	883...1226	687	10
30ХГСА ГОСТ 11268	Высокий отпуск	490...740	—	20
Сертификат 41260	» »	620	—	21
Протокол контрольных испытаний в ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ	Высокий отпуск	595	390	28

В работе принимали участие: канд. техн. наук А. Н. Тимошенко, инж. Т. Г. Соломийчук, инж. Р. И. Дмитриенко (ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины), д-р физ.-мат. наук В. В. Усов, канд. техн. наук Н. М. Шкатуляк (ЮГПУ им. К. Д. Ушинского).

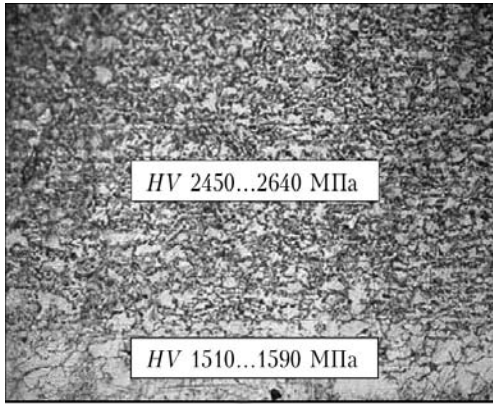


Рис. 1. Микроструктура основного металла с обезуглероженным слоем у поверхности, $\times 200$

плотность плоскостей скола $\{001\}$ на поверхности листа составляет 1,21; плоскостей сдвига $\{112\}$ — 1,15 и $\{111\}$ — 1,12. В срединных слоях соответственно 1,94; 1,7 и 2,58; в то же время при нагреве листов в ферритной области текстура сначала «обостряется» (при температурах $\approx 240...270^\circ\text{C}$), а затем с увеличением температуры приблизительно до 325°C существенно уменьшается (табл. 2).

Таким образом, результаты исследования химического состава и микроструктуры основного металла позволяют предположить, что, с одной стороны, величина углеродного эквивалента $C_{\text{экв[МИС]}} = 0,69$, а с другой — наличие обезуглероженных слоев и микрорасслоения могут существенно влиять на зарождение и развитие трещин в процессе формообразования баллона и последующего получения сварного соединения. Кроме того, одной из основных причин, способствующих расслоению листов как в состоянии поставки, так и в процессе обработки давлением при изготовлении баллонов и при их дальнейшей эксплуатации, является кристаллографическая текстура

Таблица 2. Изменение полюсной плотности P_{hkl} в зависимости от температуры нагрева

Плоскости, $\{hkl\}$	Исходное состояние	После нагрева, $^\circ\text{C}$		
		240	270	325
$\{001\}$	1,21	1,31	1,07	0,98
$\{112\}$	1,15	1,16	1,15	1,18
$\{111\}$	1,12	1,08	0,93	1,02
$\{013\}$	1,01	1,26	1,28	1,25
$\{011\}$	0,99	0,76	0,7	0,82
$\{123\}$	0,90	0,78	0,86	0,82

Таблица 3. Влияние термической обработки на коэрцитивную силу, А/см

Контролируемый участок	Состояние элементов баллона		Состояние готового изделия	
	после сварки	после отпуска 680°C , 45 мин, охлаждение воздухом	после закалки 880°C , 30 мин, охлаждение водой	после отпуска 570°C , 30 мин, охлаждение водой
Основной металл	9,5...10,5	7,5...8,5	26...30	10,5...11,5
Сварное соединение	13,5...15,5	6,5...10,0	28...30	9,5...10,0

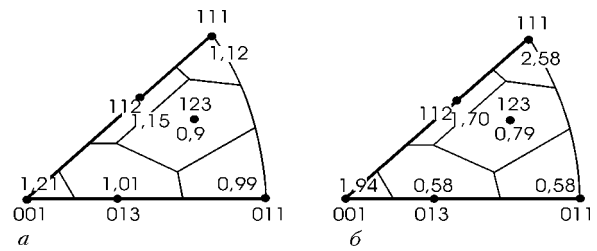


Рис. 2. Распределение полюсной плотности, нанесенное на стандартный кристаллографический треугольник: а — с поверхности листа; б — на середине толщины

основного металла. Ослабление острой текстуры, как правило, снижает склонность листа к расслоению [5, 6].

Основным типом сварных соединений баллонов были приняты стыковые швы (без разделки кромок), полученные аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом по слою активирующего флюса за два прохода с полным проплавлением при поддуве аргоном обратной стороны шва.

Металлографическим анализом сварных соединений установлено, что в состоянии после сварки металл шва и околошовная зона имеют преимущественно бейнитную структуру (рис. 3, а) с микротвердостью $HV 2970...2870$ МПа. Интересно отметить, что обезуглероженный слой в околошовной зоне наблюдается в состоянии после сварки, а в сварном шве — после закалки с отпуском. Также, как и в случае основного металла, характерным признаком этого слоя является не только визуальное отличие (рис. 3, б, в), но и пониженные значения микротвердости ($HV 1760$ МПа). При этом соотношение значений твердости основной массы металла и обезуглероженного слоя остается на уровне 1,7 раза, изменяется только их абсолютная величина. Так, после охлаждения в воду с температуры 880°C металл шва приобретает типичную структуру закалки (рис. 3, в) с микротвердостью $HV 3570...3830$ МПа. Обезуглероженный слой со структурой зернистого феррита (рис. 3, г) имеет микротвердость $HV 2210...2280$ МПа.

Предварительные эксперименты, включающие формообразование обечайки, с последующим выполнением продольных швов, показали, что в сварном соединении имеют место холодные трещины. Кроме того, в околошовной зоне из-за обезуглероживания приповерхностных слоев развиваются расслоения, наследующие расслоения основного металла.

С целью предупреждения указанных дефектов на протяжении всей технологической цепочки от обработки металла давлением до сварки и последующего испытания готового изделия структурное состояние основного металла и сварных соединений контролировали с помощью магнитометрического метода, в основу которого положено измерение коэрцитивной силы H_c [7–9]. Значения $H_c = 9,5...10,5$ А/см, которым соответствовала высокая пластичность основного металла в состоянии поставки были взяты за ориентир, на уровне которых должен был находиться металл после деформации и сварки. Как показали измерения, в сварных соединениях обечаек баллонов были зафиксированы значения H_c на уровне 13,5...15,5 А/см (табл. 3), что свидетельствует об их склонности к трещинообразованию. Для подбора оптимальных режимов сварки и термической обработки был опробован ряд технологических мероприятий. Прежде всего, в соответствии с данными химического состава согласно методике, предложенной в работе [10], была выполнена оценка значений A_{C1} и A_{C3} (755,2 и 865 °С соответственно). Эти данные хорошо согласуются с результатами определения критических температур методом дилатометрического анализа ($A_{C1} = 755...770$ °С и $A_{C3} = 840...855$ °С).

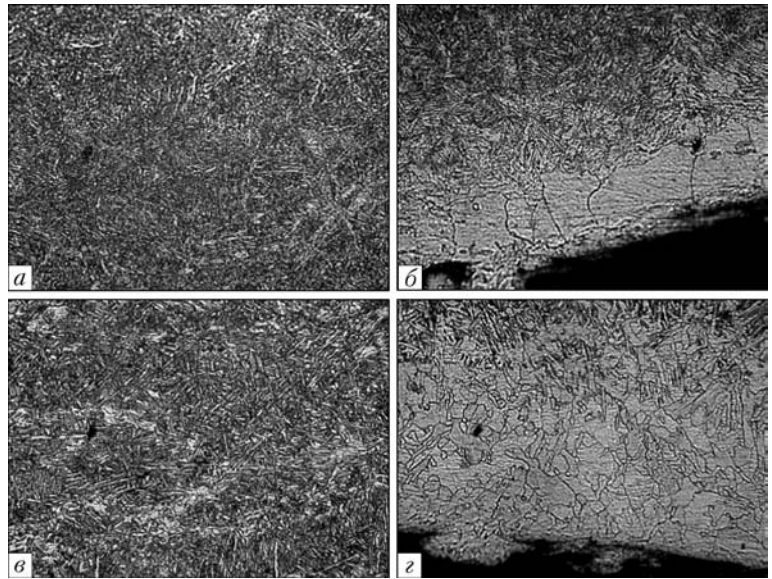


Рис. 3. Микроструктура ($\times 500$) сварного соединения в состоянии после сварки (а, б) и после последующей термообработки (в, г); а, в — центр шва; г — обезуглерожженный слой в шве; б — металле ЗТВ

С учетом установленного межкритического температурного интервала дальнейшее варьирование режимами термической обработки показало, что наиболее благоприятное влияние на структуру сварного соединения оказывает высокий отпуск. Так, отпуском при 680 °С, который следовал за сваркой каждой обечайки, значения H_c были понижены до уровня 6,5...10 А/см в сварном шве и до 7,5...8,5 А/см в основном металле. Кроме снятия остаточных напряжений, высокая температура отпуска, как известно, оказывает также влияние на текстурную перегруппировку в прокатанном металле.

Термообработкой, состоящей из закалки и отпуска, были достигнуты значения коэрцитивной силы основного металла и сварного соединения, при которых обеспечиваются требуемые прочностные характеристики сварного баллона (табл. 3). В соответствии с уточненными режимами термообработки были обработаны все баллоны партии. При этом однородность структуры металла цилиндрической стенки, оцениваемая разбросом значений H_c , не пре-

вышала 1 А/см, что вполне отвечает установленным закономерностям.

Последующие технологические испытания на сплющивание колец, вырезанных из пробных обечайек, а также 100 %-й магнитопорошковый контроль, не обнаружили каких-либо трещин ни в шве, ни в околошовной зоне.

Предусмотренное технологией упрочнение баллона для достижения запаса прочности на уровне 2,6 было осуществлено на опытных образцах. На испытание образцы поступали со следующими значениями коэрцитивной силы H_c : основного металла — 11...12 и сварного соединения — 10,5...11,5 А/см. Согласно данным, полученным при испытании однократной нагрузкой, образцы разрушились без осколков (рис. 4, б) в диапазоне давлений 39...40 МПа; соответственно запас прочности баллонов 2,6...2,66; максимальные относительные деформации, измеренные после разрушения баллонов, составили 2,2...2,3 %. При этом коэрцитивная сила основного металла, измеренная после разрушения, увеличилась до порогового значения $H_c = 18...19$ А/см, соответствующего состоянию предразрушения стали 30ХГСА.

Таким образом, результаты выполненной работы показали, что с помощью измерения коэрцитивной силы металла на протяжении всей технологической цепочки получения готового изделия могут быть получены сварные баллоны из ферромагнитных



Рис. 4. Общий вид баллона: а — до испытания; б — после испытания



сталей с необходимыми прочностными характеристиками.

1. Патон Б. Е., Савицкий М. М., Кузьменко Г. В. Перспективы применения высокопрочных среднелегированных сталей в сварных баллонах высокого давления для автотранспорта // Автомат. сварка. — 1994. — № 3. — С. 4–9.
2. Фазовые и структурные превращения при сварке и дуговой обработке соединений стали 30ХГСА / В. М. Кулик, В. Г. Васильев, Г. М. Григоренко и др. // Там же. — 2007. — № 9. — С. 10–15.
3. Макаров Э. Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей. — М.: Машиностроение, 1981. — 247 с.
4. Гиренко В. С., Рабкина М. Д. О слоисто-вязком и слоисто-хрупком разрушениях в сварных соединениях конструкционных сталей // Сварные конструкции: Тр. междунар. конф. — Киев, 1990. — С. 160–162.
5. Влияние кристаллографической текстуры на склонность к слоистому разрушению низколегированных мало-перлитных сталей / В. В. Усов, Н. М. Шкатуляк, В. С.

Гиренко и др. // Изв. АН СССР. Металлы. — 1990. — № 1. — С. 120–125.

6. Лякишев Н. П., Эгиз И. В., Шамрай В. Ф. Текстура и кристаллографические особенности разрушения материала труб из стали Х70 // Металлы. — 2000. — № 2. — С. 68–72.
7. Долинский В. М., Стогний В. Н., Новик В. Г. Анализ разрушений и возможности контроля состояния металла кислородных баллонов // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2001. — № 4. — С. 33–36.
8. Лобанов Л. М., Бондаренко А. Ю., Бондаренко Ю. К. Оценка сварных соединений конструкций магнитным (коэрциметрическим) методом для прогнозирования индивидуального остаточного ресурса // Там же. — С. 3–8.
9. Безлюдько Г. Я. Практика оценки состояния сварных швов по изменением магнитной характеристики — коэрцитивной силы металла // Там же. — С. 20–22.
10. Касаткин О. Г., Винокур Б. Б., Пилушенко В. Л. Расчетные модели для определения критических точек стали // Металловедение и термическая обработка металлов. — 1984. — № 1. — С. 20.

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

Поступила в редакцию
19.01.2009

НОВАЯ КНИГА

В. А. Троицкий. Визуальный и измерительный контроль деталей машин, металлоконструкций, сварных соединений: Учебн. пособие. — Киев, Феникс, 2009. — 276 с.

Вышла из печати книга Троицкого В. А. «Визуальный и измерительный контроль деталей машин, металлоконструкций, сварных соединений».

В книге изложены требования к порядку проведения работ по визуальному и измерительному контролю, включая требования к подготовке и аттестации персонала, средствам контроля, организации работ, документированию результатов при изготовлении, монтаже, ремонте и эксплуатации металлических конструкций, трубопроводов, энергетических объектов и др. сооружений.

Визуальный и измерительный контроль основных материалов и комплектующих проводится в качестве входного при их поступлении на предприятие с целью подтверждения соответствия требованиям нормативной документации, а также при подготовке заготовок перед началом технологических операций, например, перед сборкой соединения под сварку или перед гибкой, формовкой и т. п. и обязательно предшествует радиационным, магнитным, ультразвуковым методам поиска внутренних дефектов.

Приводятся описание разнообразных приборов, методики выполнения работ, правила приемки изделий.

Рассмотрены основополагающие международные стандарты (EN 473, ISO 9712) по подготовке персонала, которые были использованы наряду с материалами фундаментальных работ на эту тему и многолетний опыт специалистов ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины по контролю качества сварных соединений.

Настоящее пособие будет полезно дефектоскопистам, выполняющим визуально-измерительный контроль, а также абитуриентам, готовящимся получить право на проведение этого вида НК.



По вопросам приобретения книга обращаться по адресу:
03680, г. Киев-150, ул. Боженко, отд. № 4. Тел.: 287-26-66, факс: 289-21-66



ИССЛЕДОВАНИЕ НАМАГНИЧИВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ НЕОДНОРОДНОГО СЕЧЕНИЯ ДЛЯ МАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

С. Г. САНДОМИРСКИЙ

Экспериментально исследовано влияние изменений размеров модельных образцов неоднородного сечения на их намагничивание в разомкнутой магнитной цепи. Установлены закономерности формирования остаточной намагниченности образцов. Дана интерпретация полученных результатов и рекомендации по их использованию при магнитном контроле физико-механических свойств стальных болтов массового производства.

The experimental investigation revealed how variations in size of sample products with heterogeneous profiles influence their magnetization in an open magnetic circuit. Regularities in formation of the residual magnetization in the specimen were determined. Interpretation of the obtained results and recommendations on their application in magnetic testing of physico-mechanical properties of steel bolts in mass production are provided.

На металлургических и машиностроительных предприятиях выпускаются массовые партии изделий из сталей и чугунов заданной структуры. Отклонения в химическом составе и режимах термообработки изделий от заданных приводят к недопустимым изменениям их свойств, поэтому необходимо контролировать всю продукцию. Прямые методы определения механических свойств являются разрушающими и не могут быть использованы для контроля качества изделий, предназначенных для эксплуатации. Современный уровень развития науки позволяет прогнозировать возможность магнитного неразрушающего контроля режимов термообработки, химического, структурного и фазового состава изделий из конструкционных ферромагнитных материалов, а современный уровень приборной реализации метода позволяет осуществлять такой контроль в автоматическом режиме в заводских цехах и лабораториях [1–3]. Разработанные аппроксимация изменения намагниченности материалов в магнитном поле и методика расчета [4] позволяют с достаточной для практики точностью по коэрцитивной силе, намагниченности насыщения и остаточной намагниченности материала изделий, их размерам и напряженности H_e намагничивающего поля рассчитать предельную и частные петли гистерезиса конструкционных сталей, чугунов и изделий из них, остаточную намагниченность M_d изделий.

Для анализа возможностей магнитного контроля физико-механических свойств изделий из конструкционных ферромагнитных материалов необходимо знать их размагничивающий фактор. Разработанные рекомендации [5–7] по применению формул для расчета центрального коэффициента N размагничивания могут быть использо-

ваны для анализа процесса и результата намагничивания промышленных изделий, имеющих неоднородное сечение по длине (оси, штифты, nipples, муфты, гайки, шайбы). Однако не все промышленные изделия имеют простую форму. Например, на машиностроительных заводах выпускается широкая номенклатура ответственных болтов, характерной особенностью которых является неоднородность сечения по длине — наличие на торце «головки» большего сечения. На металлургических предприятиях также выпускаются изделия, имеющие неоднородное по длине сечение, например, пробка и муфта переходная, представляющие собой составной полый цилиндр с различными диаметрами и длинами составляющих.

Для теоретического анализа намагничивания таких изделий без дополнительного анализа не могут быть использованы формулы, рекомендованные в работах [5–7] для расчета N тел неоднородного сечения. Само понятие «центрального» коэффициента размагничивания для изделий неоднородного по длине сечения носит условный характер, так как координата сечения изделия, имеющего при намагничивании максимальную намагниченность, зависит, в общем случае, не только от соотношения длин участков различного сечения, но и от магнитных свойств материала и напряженности намагничивающего поля.

Целью работы является выявление особенностей намагничивания и формирования остаточной намагниченности изделий неоднородного по длине сечения.

Для проведения экспериментальных исследований процесса и результата намагничивания изделий неоднородного по длине сечения был изготовлен комплект модельных образцов, внешний вид которых в сопоставлении с реальными изделиями представлен на рис. 1.



Рис. 1. Модельные образцы и промышленные изделия неоднородного по длине сечения

Образцы длиной по 80 мм каждый изготовлены из одного прутка диаметром 18 мм стали 40Х в состоянии поставки. Участок меньшего диаметра (9 мм) получен на токарном станке на режимах резания, не приводящих к изменению свойств металла. Длина участков меньшего диаметра на различных образцах составляла 0, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 75 и 80 мм. Форма модельных образцов соответствует формам реальных промышленных изделий (рис. 1).

Для экспериментов использовали прибор «Магнитный анализатор качества структуры изделий МАКСИ (АНБ-692)» [3], предназначенный для 100%-го контроля механических свойств и разбраковки изделий в процессе движения, реализующий двухпараметровый метод контроля. Изделие (рис. 2, а), свободно падая вдоль направляющей, проходит через область со стационарным полем намагничивающей катушки, напряженность которого может ступенчато регулироваться в диапазоне от 7,4 до 37 кА/м. Исходная

высота падения изделий установлена такой, чтобы не происходило зависания изделия в намагничивающем поле. Преобразователь, предназначенный для измерения максимального магнитного потока Φ_m в изделии при намагничивании, охватывает направляющую и расположен в центральном сечении намагничивающей катушки. Для измерения остаточного магнитного потока Φ_d предназначен преобразователь, охватывающий направляющую и расположенный в системе компенсирующих катушек. При движении вдоль направляющей изделие вызывает изменение магнитных потоков $\Phi_1(t)$ и $\Phi_2(t)$ (рис. 2, б), сцепленных соответственно с первым и вторым преобразователями, и индуцирует в них ЭДС:

$$E_1(t) = -N_{b1} \frac{d\Phi_1(t)}{dt}, \quad E_2(t) = -N_{b2} \frac{d\Phi_2(t)}{dt}, \quad (1)$$

где N_{b1}, N_{b2} — количество витков в соответствующих катушках.

ЭДС $E_1(t)$ и $E_2(t)$ поступают на входы идентичных измерительных каналов, выделяющих из них однополярные импульсы напряжения (заштрихованные на рис. 2, б) и осуществляющие аналоговое интегрирование выделенных импульсов. В момент времени t_1 начала интегрирования ЭДС $E_1(t)$ поток $\Phi_1(t_1) = \Phi_n + \Phi_m$ (Φ_n — магнитное потокоцепление намагничивающей и первой измерительной катушек), а в момент времени t_3 окончания интегрирования $E_1(t)$ поток $\Phi_1(t_3) = \Phi_n$. В момент времени t_2 начала интегрирования ЭДС $E_2(t)$ поток $\Phi_2(t_2) \approx 0$, а в момент времени t_4 окончания интегрирования ЭДС $E_2(t)$ поток $\Phi_2(t_4) = \Phi_d$. Для результирующих сигналов U_1 и U_2 первого и второго измерительного каналов получено [3]:

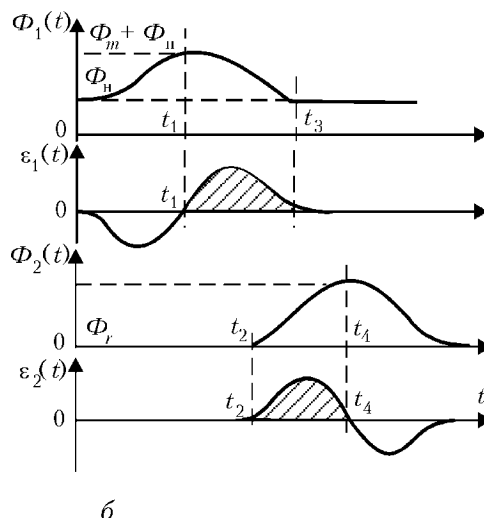
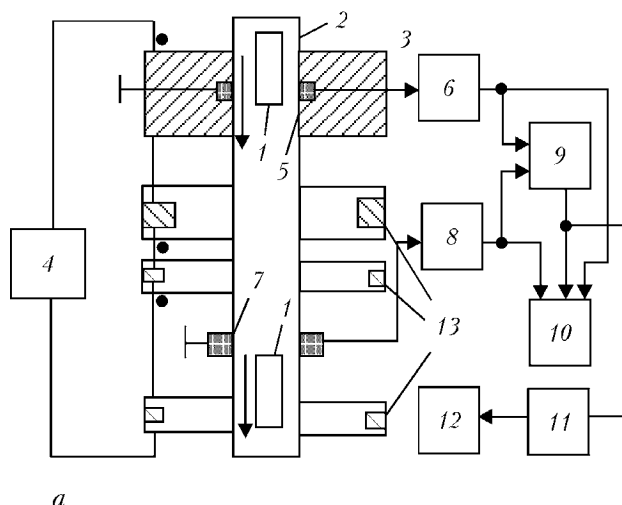


Рис. 2. Функциональная схема (а) и временные диаграммы работы (б) прибора МАКСИ (АНБ-692): 1 — контролируемое изделие; 2 — направляющая; 3 — намагничивающая катушка; 4 — источник тока; 5, 7 — измерительные преобразователи; 6, 8 — измерительные каналы; 9 — блок цифровых компараторов; 10 — блок вывода на печать; 11 — блок разбраковки; 12 — исполнительный механизм; 13 — компенсирующие катушки



$$U_1 = \frac{1}{K_n} \int_{t_1}^{t_3} E_1(t) dt = -\frac{N_{b1}}{K_n} [\Phi_1(t_3) - \Phi_1(t_1)] = \frac{N_{b1}}{K_n} \Phi_m, \quad (2)$$

$$U_2 = \frac{1}{K_n} \int_{t_2}^{t_4} E_2(t) dt = \frac{N_{b2}}{K_n} [\Phi_2(t_2) - \Phi_2(t_4)] = \frac{N_{b2}}{K_n} \Phi_d,$$

где K_n — постоянная интегрирования.

Сигналы U_1 и U_2 индицируются на цифровых индикаторах « Φ_m » и « Φ_d » прибора. Параметры N_{b1} , N_{b2} и K_n выбраны так, что $N_{b1}/K_n = 2 \cdot 10^5$ В/Вб, а $N_{b2}/K_n = 2 \cdot 10^6$ В/Вб. Относительная погрешность измерения прибора составляет не более 2,5 %.

Использование прибора МАКСИ (АНБ-692) позволяет при пролете изделия сквозь преобразователь определить значения наибольших максимального Φ_m и остаточного Φ_d магнитных потоков в изделии независимо от того, какому сечению изделия эти значения магнитных потоков соответствуют.

Для визуализации сигнала ЭДС измерительной катушки, индуцированного в ней движущимся образцом, использован запоминающий осциллограф С8-13.

Методика и результаты эксперимента. Экспериментальные исследования влияния формы экспериментальных образцов (рис. 1) на значения максимального Φ_m и остаточного Φ_d магнитных потоков в образцах проведены в режиме их свободного падения в преобразователе прибора МАКСИ (АНБ-692). Для предотвращения смещения образцов в канале преобразователя прибора диаметром 40 мм использовали центрирующую трубку внутренним диаметром 20 мм. Исследования проводили при пяти значениях напряженности намагничивающего поля H_e в намагничивающей катушке прибора: $H_e \approx 7,4; 14,8; 22,2; 29,6$ и 37 кА/м. После каждого измерения образцы тщательно размагничивались. Полученные результаты исследований влияния длины X участка большего диаметра на величины Φ_m и Φ_d в модельных образцах представлены на рис. 3. Осциллограммы ЭДС измерительной катушки средним диаметром 32 мм, содержащей 1000 витков, при падении сквозь нее с высоты 17 см экспериментальных образцов (участком большего диаметра вниз) в остаточном намагниченном состоянии после намагничивания в поле $H_e \approx 37$ кА/м представлены на рис. 4.

Обсуждение полученных результатов. Полученные результаты показывают, что в приложенном поле H_e величина максимального магнитного потока Φ_m в образцах монотонно увеличивается (рис. 3, а) с увеличением длины X области большего диаметра. При этом характер зависимостей $\Phi_m(X)$ при различных напряженностях H_e намагничивающего поля свидетельствует, что к техни-

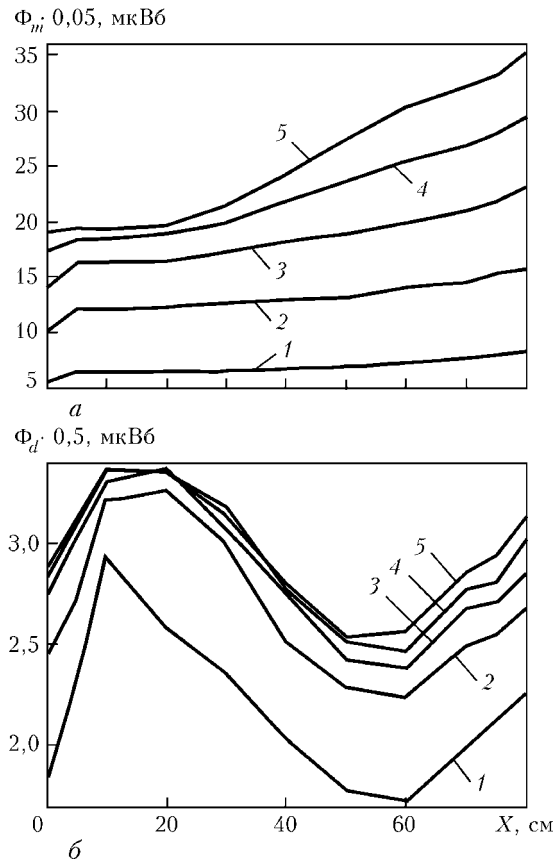


Рис. 3. Влияние длины X участка большего диаметра на величины максимального Φ_m (а) и остаточного Φ_d (б) магнитных потоков в экспериментальных образцах из стали 40Х длиной 80 мм. Измерение прибором МАКСИ (АНБ-692) при $H_e \approx 7,4; 14,8; 22,2; 29,6$ и 37 кА/м (соответственно кривые 1–5)

ческому насыщению с увеличением H_e быстрее приближается образец меньшего диаметра. Это соответствует представлениям [8] о характере изменения Φ_m в сплошном цилиндре с увеличением его «среднего» диаметра.

У образцов в остаточном намагниченном состоянии зависимости $\Phi_d(X)$ имеют немонотонный и неоднозначный характер (рис. 3, б). При крайних значениях $X = 0$ и $X = 80$ мм (для сплошных цилиндров длиной 80 мм и диаметром соответственно 9 и 18 мм) характер изменения остаточного магнитного потока Φ_d соответствует представлениям [4, 8, 9] о характере изменения Φ_d в сплошном цилиндре с увеличением его диаметра. Но при малых значениях $X = 5 \dots 10$ мм имеет место резкое (особенно после намагничивания в слабом поле) возрастание остаточного магнитного потока в образце. В результате Φ_d в образце с длиной области большего диаметра $X = 10$ мм в $2 \dots 1,3$ раза (в зависимости от напряженности H_e намагничивающего поля) превышает Φ_d в однородном по длине цилиндре меньшего диаметра и в $1,4 \dots 1,1$ раза превышает Φ_d в однородном по длине цилиндре большего диаметра. При этом, как свидетельствуют осциллограммы рис. 4, общее

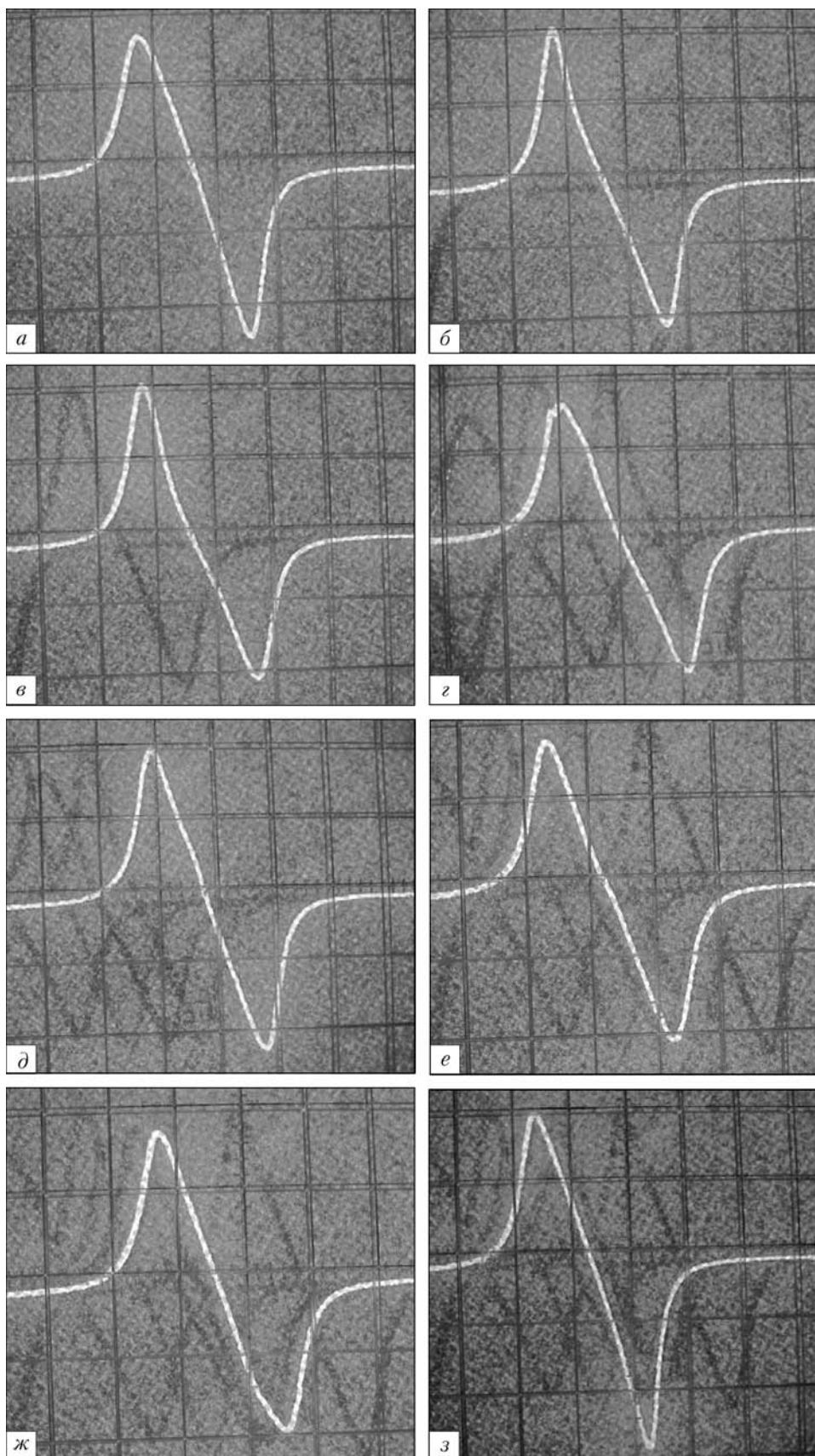


Рис. 4. Осциллограммы (20 мс/дел, 50 мВ/дел) ЭДС измерительной катушки при падении сквозь нее намагниченных образцов с различной длиной X области большего диаметра (а-з — соответственно для $X = 0; 5; 10; 20; 40; 60; 70; 80$ мм)

монотонное распределение остаточного магнитного потока вдоль образца не нарушается.

При изменении области большего диаметра экспериментальных образцов в диапазоне $X =$



= 10...20 мм Φ_d в образцах практически не изменяется (рис. 3, б), а в диапазоне изменения $X = 20...50$ мм происходит монотонное и существенное уменьшение Φ_d в образцах. При $X = 50...60$ мм (в этом диапазоне Φ_d в образцах практически не меняется) величина Φ_d составляет 85...90 % Φ_d в однородном по длине цилиндре меньшего диаметра и 70...80 % Φ_d в однородном по длине цилиндре большего диаметра. При этом, как свидетельствуют осциллограммы рис. 4, монотонное распределение остаточного магнитного потока вдоль образца не нарушается. В диапазоне изменения $X = 60...80$ мм происходит монотонное увеличение Φ_d в образцах до значения, равного Φ_d в образце большего диаметра.

Установленное явление аномального возрастания остаточного магнитного потока Φ_d в образце с малой длиной X области большего диаметра важно учитывать при выборе режима намагничивания промышленных изделий типа «болт» (рис. 1). Это явление может быть интерпретировано как снижение условного «центрального» коэффициента N' размагничивания таких изделий за счет увеличения их «эффективной» длины, связанной с увеличением площади поверхности образца в области его торца. В соответствии с этим снижением коэффициента N' должна быть скорректирована требуемая для намагничивания изделия напряженность намагничивающего поля [10] и установлен размагничивающий фактор изделия, используемый при расчете его остаточной намагниченности по методике, описанной в работах [1, 2, 4].

Выводы

В результате проведенных исследований экспериментально установлено, что увеличение длины области большего диаметра при фиксированной общей длине изделия монотонно увеличивает максимальное значение магнитного потока в изделии, измеренное в приложенном поле, и немонотонно и неоднозначно изменяет величину остаточного магнитного потока в изделии. Явление резкого возрастания остаточного магнитного потока в изделии при малых длинах области большего диа-

метра может быть интерпретировано как снижение условного «центрального» коэффициента N' размагничивания таких изделий за счет увеличения их «эффективной» длины, связанной с увеличением площади поверхности образца в области его торца. В соответствии с этим снижением N' изделий должна быть скорректирована требуемая для их магнитного структурного анализа напряженность намагничивающего поля и установлен размагничивающий фактор изделия, используемый при расчете его остаточной намагниченности.

1. *Сандомирский С. Г.* Магнитный контроль структуры стальных и чугунных изделий. Современное состояние (обзор) // *Литье и металлургия.* — 2008. — № 2. — С. 33–42.
2. *Сандомирский С. Г.* Современные возможности магнитного контроля структуры изделий (Обзор) // *В мире неразруш. контроля.* 2009. — № 1.
3. *Сандомирский С. Г.* Магнитный контроль физико-механических свойств изделий массового производства в движении (Обзор) // *Дефектоскопия.* — 1996. — № 7. — С. 24–46.
4. *Сандомирский С. Г.* Остаточная намагниченность ферромагнитного тела, намагниченного в разомкнутой магнитной цепи // *Там же.* — 1997. — № 8. — С. 50–59.
5. *Сандомирский С. Г.* Рекомендации по применению в технических расчетах формул для центрального коэффициента размагничивания сплошных и полых цилиндров, стержней и пластин из материала с высокой магнитной проницаемостью (Обзор) // *Техн. диагностика и неразруш. контроль.* — 2008. — № 3. — С. 38–46.
6. *Сандомирский С. Г.* Анализ формул для расчета центрального коэффициента размагничивания полых цилиндров из материала с высокой магнитной проницаемостью при намагничивании ортогонально образующей // *Электротехника.* — 2008. — № 3. — С. 45–51.
7. *Сандомирский С. Г.* Интерполяционная формула для расчета центрального коэффициента размагничивания коротких полых цилиндров при намагничивании параллельно образующей // *Там же.* — 2009. — № 2. — С. 52–55.
8. *Сандомирский С. Г.* Изменение чувствительности магнитного метода контроля физико-механических свойств сталей при намагничивании изделий в разомкнутой магнитной цепи (ограничения возможностей метода) // *Дефектоскопия.* — 1998. — № 7. — С. 72–81.
9. *Сандомирский С. Г.* Чувствительность остаточной намагниченности ферромагнитных изделий к магнитным характеристикам их материалов и геометрическим параметрам // *Там же.* — 1990. — № 12. — С. 53–59.
10. *Сандомирский С. Г.* Выбор величины намагничивающего поля при магнитоструктурном анализе ферромагнитных изделий // *Там же.* — 1991. — № 7. — С. 42–48.



ПОБУДОВА ТА ОБЧИСЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПОШИРЕННЯ КІЛЬЦЕВИХ МОД В ТРУБОПРОВОДІ СПРЯМОВАНИМИ ХВИЛЯМИ В УЛЬТРАЗВУКОВОМУ ДІАПАЗОНІ ЧАСТОТ

І. З. ЛЮТАК

Представлено математичну модель поширення спрямованих ультразвукових хвиль в криволінійному пружному просторі. При розробленні математичної моделі увагу приділено теоретичним засадам опису властивостей спрямованих хвиль в пружному середовищі. Отримані результати обчислень представлені у вигляді графіка дисперсії кутового хвильового числа.

The paper presents a mathematical model of propagation of directional ultrasonic waves in a curvilinear elastic medium. During development of the mathematical model attention was focused on theoretical fundamentals of description of directional waves in an elastic medium. The derived calculation results are presented in the form of a graph of dispersion of the angular wave number.

Збільшення експлуатаційної надійності газо- та нафтопровідної системи України є важливим та актуальним завданням сьогодення. Одним із підходів до підвищення надійності є удосконалення методів неруйнівного акустичного контролю. Переваги використання акустичних хвиль, їх безпечність як для фахівця-контролера, так і для об'єкту контролю, поставили цей вид неруйнівного контролю на перше місце за його поширенням серед інших методів. Проте деякі недоліки акустичних методів, а саме, точковість вимірювань при проведенні контролю великогабаритних конструкцій, таких як газо- та нафтопроводи, знижують ефективність та збільшують вартість контролю. Тому одним із підходів удосконалення акустичних методів для неруйнівного контролю таких великогабаритних конструкцій є розвиток теорії акустичного поля з метою застосування нових типів хвиль, які б дозволили уникнути точковості вимірюваних результатів. Наслідком такого підходу є розвиток теорії спрямованих хвиль, що поширюються на значні відстані без суттєвого згасання амплітуди.

В Україні суттєвий внесок в розвиток теорії спрямованими хвилями внесено науковцями ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України [1, 2]. Основним науковим напрямком їх роботи є вивчення принципів побудови діагностичних систем протяжних об'єктів на основі низькочастотного ультразвуку, а наукова діяльність тісно пов'язана із європейським досвідом дослідження спрямованих ультразвукових хвиль в рамках проекту Євросоюзу «Моніторинг стану об'єктів шляхом далекодуючого ультразвуку». Проведено дослідження систем збудження та прийому спрямованих хвиль низькочастотного ультразвуку. Стверджується, що для збудження і прийому відбитих від завад спрямованих хвиль можна використовувати різні типи первинних перетворювачів, зокрема: магнітострикційні, електро-

магнітоакустичні та п'єзоелектричні [3, 4]. Приведено основні параметри вказаних трьох типів первинних перетворювачів. Дослідження спрямованих ультразвукових хвиль проводиться також науковцями лабораторії неруйнівного контролю кафедри методів та приладів контролю якості та сертифікації продукції Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу [5–8]. Дослідження проводяться в напрямку побудови пристрою неруйнівного контролю напружено-деформованого стану металу спрямованими хвилями з використанням п'єзоелектричних первинних перетворювачів. Складовою таких досліджень є розроблення математичної моделі поширення спрямованих хвиль в прямолінійному пружному середовищі, в стінці труби та побудова алгоритмів обробки сигналів відбитих хвильових пакетів. Теоретичні дослідження взаємодії спрямованих хвиль із тріщинами проводяться в Росії [9]. Таким чином, можна зробити висновок, що неруйнівний контроль спрямованими ультразвуковими хвилями знаходиться на початку свого розвитку. Кількома науковими групами в світі проводяться дослідження як теоретичних, так і технологічних аспектів фізичного явища далекодуючого ультразвуку. Існуючі досягнення дозволяють побачити перспективність такого напрямку неруйнівного контролю та визначити основні ніші для його застосування.

Метою даного дослідження є удосконалення теорії поширення кільцевих мод спрямованих ультразвукових хвиль, що дозволить глибше зрозуміти фізичні аспекти його поширення в стінці трубопроводу, взаємодію на хвильові параметри механічних та геометричних характеристик розглядуваного трубопроводу.

Теоретичні основи поширення об'ємних ультразвукових хвиль. Розглянемо поширення ультразвукової хвилі в пружному середовищі без межі



розділу цього середовища. Будемо вважати, що середовище є настільки великим, ніж довжина хвилі, що поширення ультразвуку не зазнає впливу від відбитих хвиль.

При поширенні ультразвукової хвилі в пружному середовищі нею створюються вимушені коливання елементарного об'єму пружного середовища. Для характеристики цих коливань введемо вектор зміщення елементарного об'єму $\vec{u} = [u_x, u_y, u_z]$, що описуватиме амплітуду максимального відхилення. Для розуміння фізичного змісту вектора зміщення необхідно зазначити, що під елементарним об'ємом розуміється не окремі молекули чи атоми середовища, що коливаються без наявності звукової енергії, а деякий об'єм цього середовища, який містить певну кількість молекул так, що їх сумарний тепловий рух дорівнює нулю [10]. Коливання таких елементарних об'ємів пружного середовища нагадує коливання твердих тіл в механіці, в якій прийнято описувати коливання через поняття вектору швидкості \vec{v} . Термін вектору швидкості коливання елементарного об'єму пружного середовища потрібно розділити від вектору швидкості поширення ультразвукових хвиль. Швидкість коливань елементарного об'єму пружного середовища буде наступною:

$$\vec{v} = \frac{\vec{u}}{t} \quad (1)$$

де t — час.

Під процесом поширення ультразвукових коливань в термінах коливання елементарного об'єму мається на увазі передача зусилля від збуреного елементарного об'єму до незбуреного. При цьому завжди має лише затримку в часі, що визначає швидкість поширення ультразвукової хвилі. По всій довжині хвилі різні елементарні об'єми пружного середовища будуть мати різне зміщення: одні частини — позитивне, інші — негативне і т. д. Це створює деформації пружного середовища на рівні елементарних об'ємів. Згідно теорії механіки в такому об'ємі створюється шість незалежних компонент напружень σ_{ij} . Ультразвукова хвиля, в загальному, створить напруження, які можна описати в напрямку однієї вісі Ox таким чином:

$$\begin{aligned} & [\sigma_{xx}(x+dx) - \sigma_{xx}]dydz + [\sigma_{xy}(y+dy) - \sigma_{xy}]dxdz + \\ & + [\sigma_{xz}(z+dz) - \sigma_{xz}]dxdy = \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \right) dxdydz, \end{aligned} \quad (2)$$

де dx, dy, dz — зміщення елементарного об'єму пружного середовища, створене ультразвуковою хвилею.

Вираз (2) описує зусилля, що прикладене до певного об'єму середовища, тому, згідно II закону Ньютона, для забезпечення балансу сил повинна існувати протидія цьому зусиллю. Цією протидією є сила інерції пружного середовища, що визначається масою елементарного об'єму $\rho dxdydz$, задіяною ультразвуковою хвилею. Рівняння рівноваги сил буде таким:

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2}. \quad (3)$$

Аналогічно рівняння рівноваги сил (3) можна записати для двох інших напрямків Oy та Oz .

Описувана сила в виразі (3) викликає розтяг чи зсув елементарного об'єму пружного середовища. В будь-якій механічній системі діють сили, що спрямовані на відтворення первинного стану. Ці сили визначаються через деформації елементарного об'єму пружного середовища. Рівняння рівноваги напружень, викликаних зусиллям проходження ультразвукової хвилі та зусиль, спрямованих на відтворення попереднього стану, можна представити так:

$$\sigma_{xx} = 2\mu \frac{\partial u_x}{\partial x} + \lambda \operatorname{div} \vec{u}, \quad \sigma_{xy} = \mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right), \quad (4)$$

де μ, λ — константи Ляме, $\operatorname{div} = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}$ — оператор дивергенції.

Рівняння (4) можна за аналогією записати для двох інших координатних осей. Привівши (3) та (4) в одне рівняння, отримаємо опис коливання елементарного об'єму пружного середовища при проходженні ультразвукової хвилі:

$$\begin{aligned} \mu \Delta u_x + (\mu + \lambda) \frac{\partial(\operatorname{div} \vec{u})}{\partial x} &= \rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2}, \\ \mu \Delta u_y + (\mu + \lambda) \frac{\partial(\operatorname{div} \vec{u})}{\partial y} &= \rho \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2}, \\ \mu \Delta u_z + (\mu + \lambda) \frac{\partial(\operatorname{div} \vec{u})}{\partial z} &= \rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2}, \end{aligned} \quad (5)$$

де $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} = \operatorname{div} \operatorname{grad}$ — оператор Лапласа.

Рівняння (5) є загальним описом пружного середовища, збуреного ультразвуковою хвилею. Проводити аналіз (5) в загальному записі є надзвичайно складно, оскільки його розв'язком є багато різних комбінацій хвиль, що поширюються в довільному напрямку. Для спрощення аналізу припустимо, що ультразвукова хвиля є плоскою і поширюється в напрямку однієї координатної вісі, наприклад x . В цьому випадку компоненти оператора Лапласа та дивергенції зменшаться тільки до одного, а вираз (5) матиме такий вигляд:

$$\begin{aligned} (2\mu + \lambda) \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} &= \rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2}, \quad \mu \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} = \rho \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2}, \\ \mu \frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} &= \rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2}. \end{aligned} \quad (6)$$

Перше рівняння описує коливання елементарного об'єму пружного середовища, що співпадає за напрямком із поширенням ультразвукової хвилі.



Такою хвилею є поздовжня і відповідно вона створює тільки один компонент тензору напружень σ_{xx} . Два інші рівняння (6) описують коливання елементарного об'єму в напрямку, що перпендикулярний поширенню ультразвукової хвилі. Такі коливання збуджують тільки зсувні напруження σ_{xy} та σ_{xz} . Очевидно, що навіть у спрощеному розгляді поширення ультразвукової хвилі в пружному середовищі може бути багато розв'язків, які залежать від напрямку поширення хвилі та від співвідношення їх амплітуд.

У виразі (6) кожне рівняння правої і лівої частини описує рівність швидкості коливання через зміщення елементарного об'єму пружного середовища, тому частково продиференціювавши ліву частину по x та праву по t , отримуємо значення для швидкості поширення ультразвукової хвилі:

$$c_l = \sqrt{\frac{2\mu + \lambda}{\rho}}, \quad c_t = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}. \quad (7)$$

де c_p , c_t — відповідно швидкості поширення поздовжньої та поперечної хвиль.

Розглянемо коливання частинок середовища, збуджених поперечною хвилею. Припустимо, що частинки коливаються за гармонійним законом:

$$\begin{aligned} u_y(x,t) &= U_y \cos(\omega t - k_x x - \varphi_1), \\ u_z(x,t) &= U_z \cos(\omega t - k_x x - \varphi_1), \end{aligned} \quad (8)$$

де $k_t = \omega/c_t$ — хвильове число; ω , φ_i — відповідно частота та фаза коливань; U_y , U_z — амплітуди коливань.

Напрямок коливань елементарних частинок середовища визначається із (8) за кутом із віссю Oy так:

$$\angle \alpha = \arctan(U_y/U_z). \quad (9)$$

У випадку, коли $\varphi_1 \neq \varphi_2$, поперечні коливання поляризуються у еліптичні, що є загальним випадком ультразвукової хвилі в пружному середовищі.

Рівняння (7)–(9) дають підстави стверджувати, що поздовжні та поперечні ультразвукові хвилі можуть поширюватись в будь-якому напрямку в пружному середовищі, причому швидкість поширення таких хвиль не залежить від напрямку. Тому при розгляді властивостей таких хвиль не беруться до уваги межі розділу пружного середовища із навоколишнім.

Ультразвукові хвилі в пластинах. Розглянемо поширення ультразвукових хвиль в пластині. Припустимо, що пластинка має нескінченну довжину в напрямку вісі x , одну товщину та ізотропні властивості матеріалу. Нехай напрям поширення ультразвукових хвиль співпадає із координатою x . Розширення, яке створюватиме ультразвукова хвиля, буде таким:

$$\delta l/l = 1/E \cdot F/S, \quad (10)$$

де δl — відносне видовження довжини; E — модуль Юнга; F — зусилля, створене хвилею; S — площа поперечного перерізу.

Зусилля F , створене ультразвуковою хвилею, створить напруження в напрямку вісі x :

$$\sigma_{xx} = E \frac{\partial u_x}{\partial x}, \quad (11)$$

Іншим зусиллям, що діє в пластині, є зусилля згину. При цьому зусиллі відносне видовження шару пружного середовища, що лежить всередині пластини, не знає відносного видовження. Частина пластини під і над серединним шаром зазнає стискування та видовження на величину dx . Напруження визначаються через момент M , що пропорційний радіусу кривизни, а отже і другій похідній від переміщення:

$$M = -K \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2}, \quad (12)$$

де $K = \frac{h^3}{12} \frac{E}{1-\nu^2}$ — коефіцієнт; h — товщина пластини; ν — коефіцієнт Пуассона.

Рівняння (5), (10)–(12) визначають взаємозв'язок між константами Ляме та модулем Пуассона:

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad \lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}. \quad (13)$$

Рівність (13) та (7) визначають взаємозв'язок між швидкостями поздовжньої та поперечної хвиль:

$$\frac{c_l}{c_t} = \sqrt{2 \frac{1-\nu}{1-2\nu}}. \quad (14)$$

Рівняння (10)–(14) описували деформацію пластини в статичному чи квазістатичному режимі, при якому не враховувалась швидкість деформації. При поширенні ультразвукової хвилі швидкість деформації має значний вплив у формі інерції елементарного об'єму пружного середовища, тому рівняння поширення хвилі буде ґрунтуватись на рівновазі зусиль:

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} = \rho \frac{\partial v_x}{\partial t} = \rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2}. \quad (15)$$

За аналогією до виразу (6) та на основі рівності (15) рівняння поширення ультразвукової хвилі буде таким:

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} = \frac{\rho}{E} \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2}. \quad (16)$$

Із (16) швидкість поширення ультразвукових хвиль, в яких елементарний об'єм пружного середовища рухається у напрямку поширення хвилі, буде такою:



$$c_a = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}} \quad (17)$$

Рівняння (17) описує коливання елементарного об'єму, в якому переважає поздовжня складова ультразвукової хвилі. Воно справджується тільки у випадку, коли товщина пластини є меншою, ніж довжина ультразвукової хвилі. У іншому випадку на швидкість хвилі буде впливати її товщина і тому вони будуть мати дисперсійний характер. Ці хвилі називають антисиметричними, оскільки коливання верхніх граней пластини проходять у протифазі (рис. 1, а).

Як видно із рис. 1, а напрям зміщення елементарного об'єму пружного середовища не повністю збігається із напрямком поширення хвилі в пластині, проте характер коливань (періодичне стиснення та розширення середовища) робить таку хвилю подібною до об'ємної поздовжньої.

Збудження антисиметричної моди у найбільш простому випадку можливе при прикладанні зусилля у напрямку довжини пластини. Аналогічно, при прикладанні зусилля до поверхні пластини, збуджуються зсувні хвилі, які називаються симетричними, оскільки їх грані коливаються в одній фазі (рис. 1, б).

Рівняння поширення симетричних хвиль буде таким [10]:

$$\Delta^2 u_x + 12\rho \frac{1-\nu^2}{h^2 E} \frac{\partial u_x}{\partial t^2} = 0. \quad (18)$$

Подібно до антисиметричних мод, зміщення елементарного об'єму пружного середовища не є повністю поперечними, проте їх властивості подібні до поперечних об'ємних хвиль.

Розв'язок (18) є складнішим ніж для антисиметричних мод, оскільки незалежними змінними є зміщення перпендикулярне до напрямку поширення хвилі u_y та його похідна, згинний момент M та зусилля F_y . Незалежними змінними при поширенні

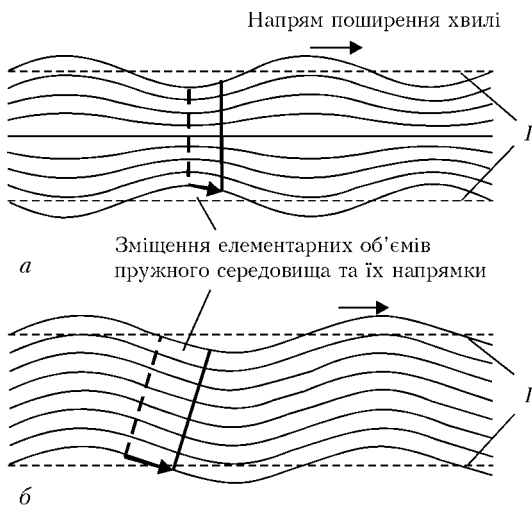


Рис. 1. Поширення антисиметричної (а) та симетричної (б) моди ультразвукової хвилі (l — межі розділу у незбудованій ультразвуковою хвилею пластині)

антисиметричної моди є зміщення u_x та напруження σ_{xx} .

Розв'язком (18) є:

$$u(x,t) = U_x \exp\left(\pm x \sqrt{\omega^2 12\rho \frac{1-\nu^2}{h^2 E}} \exp(j\omega t)\right). \quad (19)$$

Останній множник виразу (19) вказує на гармонійну складову поширення хвилі. Перший експоненціальний множник описує коливання амплітуди хвилі.

Поширення спрямованої ультразвукової хвилі в криволінійному середовищі. Для побудови математичної моделі поширення кільцевих мод в трубопроводі візьмемо за основу циліндричну систему координат r, θ, z , (рис. 2).

Будь-яка пружна хвиля, в тому числі і кільцеві моди спрямованих хвиль, можуть бути представлені загальним фундаментальним хвильовим рівнянням аналогічно до (3):

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial^2 u_r}{\partial t^2} &= \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}}{r}, \\ \rho \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial t^2} &= \frac{\partial \sigma_{\theta r}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_{\theta z}}{\partial z} + 2 \frac{\sigma_{r\theta}}{r}, \\ \rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} &= \frac{\partial \sigma_{zr}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{z\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{zr}}{r}. \end{aligned} \quad (20)$$

Для спрощення цих рівнянь використаємо підхід розділу хвильових полів Хельмгольца. Для цього представимо закон коливань елементарних частинок у двох напрямках поляризації хвильового поля для поздовжніх ϕ та поперечних ψ хвиль:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta^2} + k_l^2 \phi &= 0, \\ \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \theta^2} + k_t^2 \psi &= 0, \end{aligned} \quad (21)$$

де k_l та k_t — відповідно хвильові числа для поздовжньої та поперечної об'ємної ультразвукової хвилі.

Хвильове число для об'ємних ультразвукових хвиль може бути обчислене так:

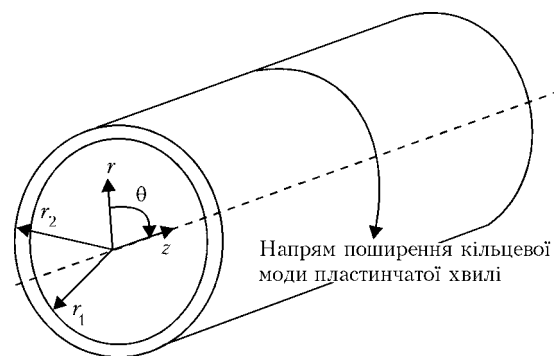


Рис. 2. Поширення кільцевих мод ультразвукової пластинчастої хвилі в трубі: r_1, r_2 — відповідно внутрішній та зовнішній радіуси труби

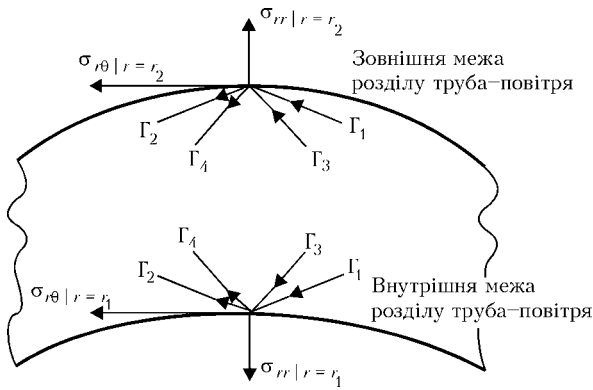


Рис. 3. Граничні умови при поширенні кільцевої моди ультразвукової спрямованої хвилі

$$k_l = \frac{\omega}{c_l}, \quad k_t = \frac{\omega}{c_t}. \quad (22)$$

Гармонійні коливання описуватимуться так:

$$\begin{aligned} \varphi(r, \theta) &= \Phi(r) \exp(ik_\theta \theta), \\ \psi(r, \theta) &= \Psi(r) \exp(ik_\theta \theta), \end{aligned} \quad (23)$$

де k_θ — кутове хвильове число.

Підставивши (23) в (21), отримаємо математичний опис кільцевої моди спрямованої хвилі за двома її складовими, об'ємними поздовжніми та поперечними хвилями [11]:

$$\begin{aligned} (k_r r)^2 \frac{\partial^2 \Phi}{\partial (k_r r)^2} + (k_r r) \frac{\partial \Phi}{\partial (k_r r)} + ((k_r r)^2 - k_\theta^2) \Phi &= 0, \\ (k_r r)^2 \frac{\partial^2 \Psi}{\partial (k_r r)^2} + (k_r r) \frac{\partial \Psi}{\partial (k_r r)} + ((k_r r)^2 - k_\theta^2) \Psi &= 0. \end{aligned} \quad (24)$$

Представимо (24) за допомогою функцій Бесселя:

$$\begin{aligned} \Phi &= \Gamma_1 J(k_r r) + \Gamma_2 Y(k_r r), \\ \Psi &= \Gamma_3 J(k_r r) + \Gamma_4 Y(k_r r), \end{aligned} \quad (25)$$

де $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4$ — амплітуди об'ємних поздовжніх та поперечних ультразвукових хвиль.

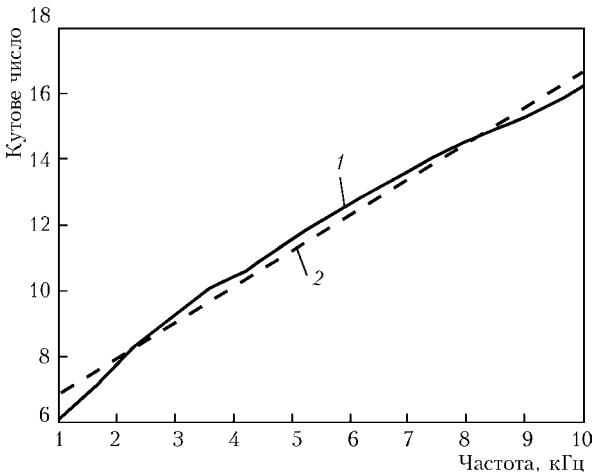


Рис. 4. Дисперсійна крива кутового числа спрямованої ультразвукової хвилі в трубі діаметром 273 мм: 1 — апроксимація сплайном; 2 — лінійна апроксимація

Для визначення граничних умов визначимо компоненти вектору напружень елементарного об'єму пружного середовища на межі розділу пружне середовище — повітря. З цією метою визначимо напруження, створені зміщенням від проходження ультразвукової спрямованої хвилі:

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} &= -\lambda k_l^2 \varphi + 2\mu \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial \psi}{\partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \psi}{\partial r \partial \theta} \right), \\ \sigma_{r\theta} &= \mu \left(\frac{2}{r} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r \partial \theta} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \theta^2} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right). \end{aligned} \quad (26)$$

Граничні умови для (26) зображено на рис. 3.

Як видно із рис. 3, кожен компонент напружень σ_{rr} та $\sigma_{r\theta}$ формується чотирма об'ємними ультразвуковими хвилями, поздовжніми та поперечними.

Для знаходження невідомих амплітуд об'ємних хвиль (25) запишемо характеристичне рівняння, що характеризує хвильове поле на межі розділу середовищ труба-повітря [11]:

$$\begin{pmatrix} \Lambda_{11} & \Lambda_{12} & \Lambda_{13} & \Lambda_{14} \\ \Lambda_{21} & \Lambda_{22} & \Lambda_{23} & \Lambda_{23} \\ \Lambda_{31} & \Lambda_{32} & \Lambda_{33} & \Lambda_{34} \\ \Lambda_{41} & \Lambda_{42} & \Lambda_{43} & \Lambda_{44} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \Gamma_1 \\ \Gamma_2 \\ \Gamma_3 \\ \Gamma_4 \end{pmatrix} = 0, \quad (27)$$

де Λ_{ij} — члени характеристичної матриці, які визначаються частотою та хвильовим числом.

Для числового розв'язку (27) необхідно знати один із компонентів матриці Γ_i . З іншої сторони, компоненти характеристичної матриці складаються із функцій Бесселя та першої, другої її похідних. Для рішення (27) необхідно знайти значення детермінанту Λ_{ij} . Нами розроблено алгоритм розв'язку (27) в середовищі Matlab. Результати розрахунку детермінанту (27) для газопроводу діаметром 273 мм приведені на рис. 4.

Отримані результати дозволяють визначити параметри симетричної та антисиметричної мод спрямованих хвиль в криволінійному пружному просторі.

Результати розрахунку детермінанта (27) апроксимувались сплайном із коефіцієнтом апроксимації 0,99 та прямою лінією. Як видно із рис. 4, числовий розв'язок містить неточності, пов'язані із пошуком кореня (27), який виконувався алгоритмом пошуку кореня пакету Matlab. Для покращення отриманого результату необхідно розробити новий підхід до обчислення першої та другої похідної функцій Бесселя та алгоритму числового пошуку кореня функції.

Целью данного исследования является усовершенствование теории распространения кольцевой моды направленной ультразвуковой волны, что позволит глубже понять физические аспекты ее распространения в стенке трубопровода, взаимодействие волновых параметров с механическими и геометрическими характеристиками рассматриваемого трубопровода. Понимание процесса распространения ультразвуковых колебаний в терминах ко-



лебания элементарного объема — это передача усилия от возмущенной части среды к невозмущенной. Это создает деформацию упругой среды на уровне элементарных объемов. Согласно теории механики в таком объеме создается шесть независимых компонент напряжений (2).

Выражение (2) описывает усилие, которое прилагается к определенному объему среды, и согласно II закону Ньютона для обеспечения баланса силы должно существовать противодействие этому усилию. Этим противодействием является сила инерции упругой среды (5). Уравнение (5) является общим описанием упругой среды, возмущенной ультразвуковой волной. Проводить его анализ в общей записи чрезвычайно сложно, поскольку его решением является много различных комбинаций волн, которые распространяются в произвольном направлении. Для упрощения анализа допустим, что ультразвуковая волна является плоской и распространяется в направлении одной координатной оси, например x (6).

Уравнения (10)–(19) математически описывают форму колебаний направленной ультразвуковой волны в пластине на основании уравнения (6). Уравнение (17) описывает колебание элементарного объема, в котором преобладает продольная составляющая ультразвуковой волны. Оно выполняется только в случае, когда толщина пластины меньше, чем длина ультразвуковой волны. В другом случае на скорость волны влияет ее толщина, и поэтому она будет иметь дисперсионный характер. Эта волна называется антисимметричной, поскольку колебания верхней грани пластины проходят в противофазе, рис. 1. Аналогично представлено уравнение (18) для симметричной волны (рис. 2).

Уравнения (20)–(27) представляют математическое описание волновых параметров направленной ультразвуковой волны в стенке трубопровода (рис. 3). Представлены граничные условия для формирования этой волны в стенке трубы и ее распространения (рис. 4). Как видно из рис. 4, каждый компонент напряжений, вызванных направленной волной, формируется четырьмя объемными ультразвуковыми волнами, продольными и поперечными.

Для нахождения неизвестной амплитуды объемных волн, которые формируют направленную волну (25), составлено характеристическое уравнение на основании граничных условий раздела сред труба–

воздух. На рис. 5 представлен график дисперсии углового волнового числа от частоты. Полученные результаты позволяют определить параметры симметричной и антисимметричной моды направленной волны в стенке трубы.

1. Патон Б. Е., Троицкий В. А., Бондаренко А. И. Метод низкочастотного ультразвукового контроля протяженных объектов направленными волнами // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2008. — № 2. — С. 20–30.
2. Троицкий В. О. Хвилеводний низькочастотний ультразвуковий контроль протяжених об'єктів з обмеженим доступом до поверхні // III Науково-практ. конф. «Організація неруйнівного контролю якості продукції в промисловості». — 30 квітня 2005. — Аланья (Туреччина). — С. 5–7.
3. Техника контроля направленными волнами для эксплуатационного контроля заводских трубопроводов / Т. Икэда, Р. Канэхара, М. Миадзева и др. // Nihakai Kensa. — 2005. — 54, № 11. — С. 595–599.
4. Ямасаки Т. Применение электромагнитных акустических сенсоров для направленных волн в неразрушающем контроле проволоки, труб и плит // Там же. — С. 606–611.
5. Lyutak I. Wavelet analysis of ultrasonic guided waves in pipeline inspection / IEEE Intern. workshop on intelligent data acquisition and advanced computing systems: technology and applications. — Sofia, Bulgaria. — P. 517–523.
6. Лютак І. З. Моделювання методом кінцевих елементів поширення нульових мод плоских хвиль Лемба в пластині з ортотропними механічними властивостями // Вісник Хмельницького нац. ун-ту. — 2007. — № 6. — Т. 1. — С. 151–156.
7. Лютак І. З., Мандра А. А. Визначення напружено-деформованого стану газопроводів за допомогою ультразвукових хвиль Лемба // Методи та прилади контролю якості. — 2004. — № 12. — С. 24–29.
8. Лютак І. З. Контроль технічного стану магістральних трубопроводів кільцевими модами пластинчатих ультразвукових хвиль // Зб. наук. праць. Сер.: Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. Теорія і практика неруйнівного контролю матеріалів і конструкцій. — Видання Фіз.-мех. ін-ту ім. Г. В. Карпенка НАН України. — 2008. — Вип. 13. — С. 193–198.
9. Взаємодія крутильних волн с продольними трещинами труб / Г. А. Буденков, О. В. Недзвецькая, Д. В. Злобин, С. А. Мурашов // Дефектоскопия. — 2006. — № 6. — С. 58–66.
10. Kuttruff H. Acoustics. An introduction. New York: Taylor & Francis. — 2007. — 472 p.
11. Fast techniques for calculating dispersion relations of circumferential waves in annular structures / J. Fong, M. J. S. Lowe, D. Gridin, R. V. Craster // Review of Progress in Quantitative NDE (American Institute of Physics). — 2003. — № 22. — P. 213–220.



ОЦІНКА ДЕГРАДАЦІЇ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЯК ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕХНІЧНОГО СТАНУ МАТЕРІАЛІВ КОНСТРУКЦІЙ ТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

О. Т. ЦИРУЛЬНИК

Приведені результати дослідження деградації механічних і корозійних властивостей конструкційних сплавів відповідальних конструкцій внаслідок їх довготривалої експлуатації (до 40 років). Розглянуті перспективи використання електрохімічних методів для діагностування експлуатаційної деградації матеріалів.

The paper presents a mathematical model of propagation of directional ultrasonic waves in a curvilinear elastic space. In development of a mathematical model attention was given to theoretical fundamentals of description of the properties of directional waves in an elastic environment. Obtained calculation results are given in the form of a graph of dispersion of an angular wave number.

Діагностування технічного стану конструкцій тривалої експлуатації базується, в основному, на виявленні методами неруйнівного контролю (НК) та характеристиці різного виду дефектів. Їх геометрія, умови навантаження та властивості матеріалу використовуються для обґрунтування безпечної експлуатації конструкції, включаючи розрахунок залишкового ресурсу. Однак при цьому необхідно брати до уваги можливу деградацію фізико-механічних властивостей матеріалів внаслідок тривалої експлуатації, які визначають їх роботоздатність. Останнім часом проблемі експлуатаційної деградації надається особлива увага [1–9], оскільки значна частина конструкцій відповідального призначення у багатьох галузях промисловості та транспорті вже вичерпала свій плановий ресурс, який складає десятки років.

В роботі приведені основні закономірності деградації механічних і корозійних властивостей сталей магістральних газо- (10ГС) і нафтопроводів (Х52) [5, 6], великоємних резервуарів зберігання нафти (СтЗсп) [7], парогонів ТЕС (12ХМФ) [8] та авіаційного алюмінієвого сплаву (Д16чТ) [9], виділено найбільш чутливі показники їх експлуатаційної деградації та показано перспективи використання електрохімічних методів для діагностування експлуатаційної деградації.

Аналіз механічних показників експлуатаційної деградації конструкційних сплавів. Вплив експлуатації на властивості конструкційних сплавів характеризували параметром λ :

$$\lambda = (P_0 - P_d)100\%/P_0,$$

де P_0 , P_d — значення механічних характеристик матеріалу до та після максимального терміну експлуатації.

Встановлено, що стандартні характеристики міцності мало чутливі до зміни стану матеріалу внаслідок його експлуатації. Високотемпературна експлуатація паропроводів ТЕС впродовж ~ 200 тис. год. практично не впливає на межі пластичності ($\sigma_{0,2}$) і міцності (σ_B) сталі 12Х1МФ (рис. 1, а). Експлуатація трубних сталей нафто- та газопроводів впродовж 10–20 років, як правило, підвищує їх міцність [1, 2]. Останнє пов'язують із деформаційним старінням сталей, що зазнали значної пластичної деформації [1]. Однак за тривалішої експлуатації (30–40 років) їх характеристики міцності можуть падати (рис. 1, б, в).

Внаслідок тривалої експлуатації досліджених сталей відносно звуження ψ однозначно знижується (рис. 1, а–д), проте для сталей газопроводів встановлено феномен збільшення відносно-го видовження δ (рис. 1, б). Цей результат важливо брати до уваги, оскільки на основі тільки оцінок δ можна помилково вважати, що експлуатація сприяє підвищенню пластичності матеріалу.

Експлуатація (25 років) авіаційних алюмінієвих сплавів також супроводжується підвищенням їх характеристик міцності (рис. 1, д). Проте на відміну від сталей для них властиве особливо сильне падіння відносного видовження, що свідчить про високий ризик крихкого руйнування таких матеріалів.

Для оцінювання деградації конструкційних сплавів ефективним є використання параметрів механіки руйнування, а саме, статичної J_{Ic} і циклічної ΔK_{fc} тріщиностійкості, ефективного розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень $\Delta K_{Ih\text{ eff}}$ (рис. 1, а–в, е).

Неоднозначні результати отримано при визначенні ударної в'язкості KCV . Ця характеристика практично не чутлива до експлуатаційної деградації теплостійких сталей (рис. 1, а), однак кардинально

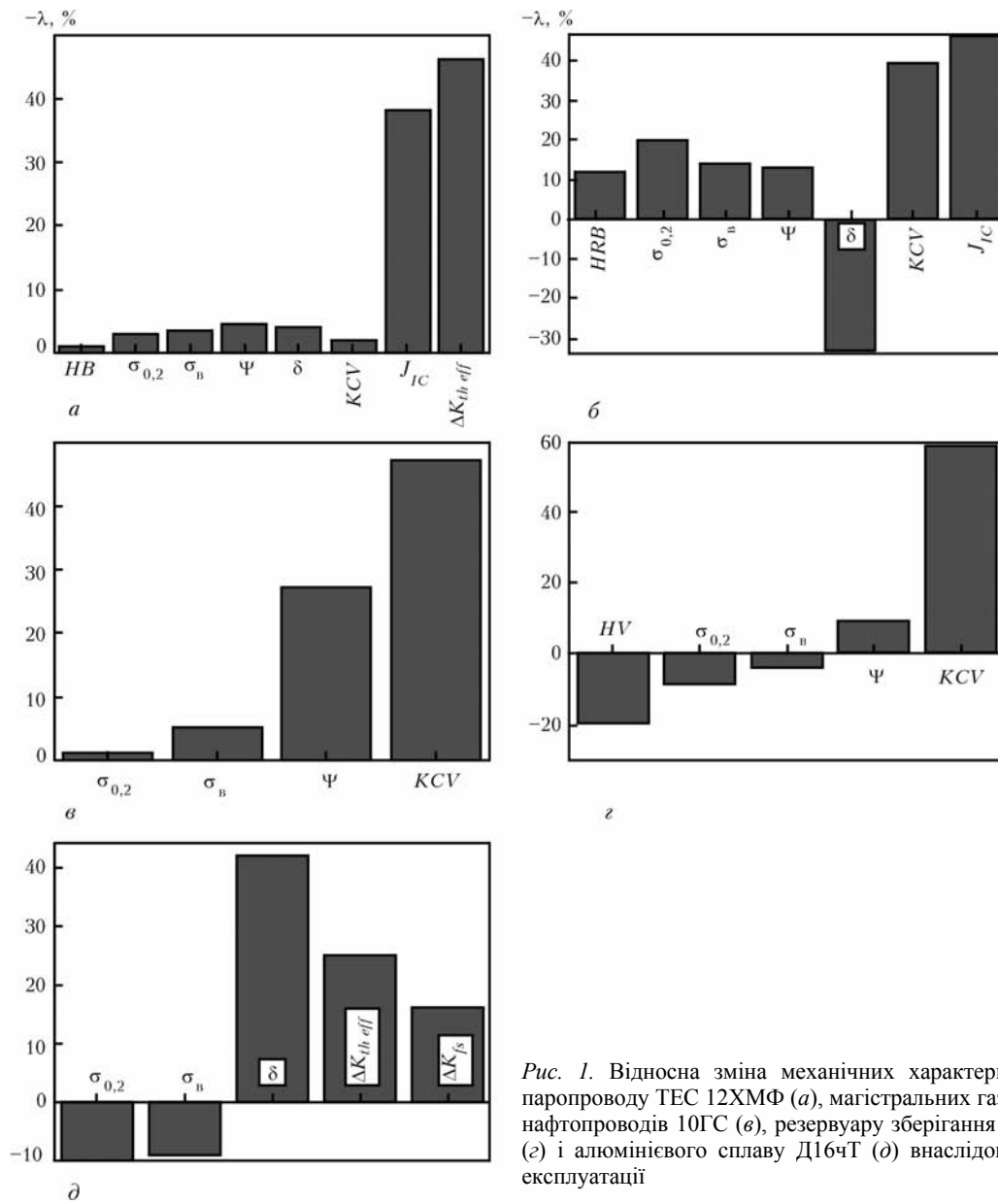


Рис. 1. Відносна зміна механічних характеристик сталей паропроводу ТЕС 12ХМФ (а), магістральних газопроводів X52 (б) та нафтопроводів 10ГС (в), резервуару зберігання нафти СтЗсп (г) і алюмінієвого сплаву Д16чТ (д) внаслідок їх тривалої експлуатації

знижується внаслідок тривалої експлуатації сталей магістральних трубопроводів (рис. 1, б, в) та резервуарів зберігання нафти (рис. 1, г).

Слід підкреслити, що для експлуатованих сталей властиві деякі особливості їх механічної поведінки. А саме, одночасне зниження міцності (опору пластичному деформуванню) та ударної в'язкості і тріщиностійкості (опору крихкому руйнуванню) експлуатованого матеріалу є нетиповим явищем. Адже низький опір крихкому руйнуванню властивий саме матеріалам з високими твердістю та міцністю. Тому виявлена особливість є феноменом експлуатаційної деградації, оскільки за впливу будь-яких інших відомих чинників (термічне оброблення, легування, деформування) на метал тенденція зміни цих його характеристик була б протилежною. Також особливим є часто протилежний характер зміни характеристик пластичності: відносне звуження δ падає, а відносне видовження Ψ зростає.

Таким чином, аналіз впливу тривалої експлуатації на механічні властивості конструкційних сплавів показує, що саме їх характеристики опору крихкому руйнуванню, ударна в'язкість, статична чи циклічна тріщиностійкість найбільш залежать від експлуатаційної деградації. Це зумовлено очевидно тим, що ці характеристики чутливі до механічної поведінки матеріалу у мезооб'ємі, тоді як стандартні механічні властивості — у макрооб'ємі.

Дві стадії експлуатаційної деградації сталей та роль корозійно-наводнювальних середовищ. Експлуатаційну деградацію властивостей конструкційних сталей пов'язують, як правило, з перебігом процесу деформаційного старіння, коли характеристики міцності підвищуються, а пластичності знижуються. На це, зокрема, вказують



дані про зміну властивостей трубопровідних сталей тривалістю експлуатації до 10–20 років [1–3]. Проте отримані нами результати дають підстави розглядати у загальному випадку процес деградації у дві стадії: стадію деформаційного старіння та стадію розвитку розсіяної пошкодженості (після 10–20 років експлуатації). Можливість інтенсивної пошкодженості матеріалу внаслідок тривалої експлуатації прямо чи опосередковано підтверджують насамперед розглянуті вище особливості деградації його механічних властивостей. Це протилежний характер зміни двох характеристик пластичності. Зменшення ψ узгоджується зі спадом опору крихкому руйнуванню, тоді як ріст видовження відбиває поведінку матеріалу із розсіяною пошкодженістю (дефектністю). Тобто при розтягуванні зразка із деградованого матеріалу розкриваються мікрodefekти, що формально сприймається як ріст δ . Саме розвиток пошкодженості може обумовити і таку специфічну механічну поведінку деградованого металу, як одночасне зниження, з одного боку, міцності і твердості, а з іншого — опору крихкому руйнуванню. На інтенсивнішу пошкодженість металу після його тривалої експлуатації вказують результати дослідження поведінки водню у сталях X52 нафто- і газопроводів. З використанням методу вакуумної екстракції встановлено, що з деградованого металу виділяється, з одного боку, в 1,5...2 рази більше залишкового водню, а з іншого — в основному його високотемпературна фракція (400...600 °С), тоді як з металу труби запасу — практично тільки низькотемпературна (200 °С). Це свідчить, що трубній сталі у вихідному стані властиві низькоенергетичні водневі пастки — вакансії та дислокації. Відповідно, у деградованому металі наявні високоенергетичні пастки, яких немає у вихідному стані. Отже, внаслідок тривалої експлуатації сталі виникла пошкодженість, мікротріщини, тобто дефекти структури, які відмінні від вакансій та дислокацій. Про збільшення «глибини» водневих пасток свідчить також суттєве зменшення коефіцієнтів дифузії та величини потоку дифузійного водню у деградованому металі за електрохімічної оцінки проникності водню крізь мембрану.

Слід підкреслити важливу роль водню як необхідного чинника у реалізації другої стадії деградації сталі. Відповідальні об'єкти тривалої експлуатації часто експлуатуються у корозійно-наводнювальних середовищах, тому важливо при аналізі експлуатаційної деградації брати до уваги не деградацію поверхні внаслідок суто корозійного впливу: появу пітингів, виразок чи корозійних тріщин, що часто класифікують як деградацію конструкцій і діагностуються відомими методами дефектоскопії [10]. Однак в роботі розглядають деградацію властивостей, що зумовлена змінами

на субструктурному рівні: ростом внутрішніх напружень, виділенням вторинних фаз та розвитком розсіяної мікропошкодженості. Тому слід враховувати також вплив на механічну поведінку металу водню, абсорбованого ним в процесі експлуатації і здатним дифундувати на глибини, порівняльні з характерними розмірами елементів конструкції. На це вказує вища концентрація залишкового водню у деградованому металі, порівняно із вихідним, як для паропроводів, так і для нафто- та газопроводів. Оскільки, з одного боку, водень в загальному полегшує руйнування металів, то за сумісної дії експлуатаційних навантажень сприяє розвитку розсіяної мікропошкодженості. А, з іншого боку, відомо, що він інтенсифікує і дифузійні процеси [8]. Отже, мова може йти про можливе прискорення ним обох стадій деградації матеріалу.

Наочно це ілюструється випадками, коли дії агресивного середовища піддається тільки певна частина конструкції і саме її матеріал характеризується гіршими властивостями. Показовими у цьому плані є дослідження демонтованого після 30 років експлуатації резервуару для нафти, на дні якого збирається залишкова (підтоварна) вода, що осідає з нафтопродукту. Найвищий рівень ударної в'язкості та корозійної тривкості властивий середній ділянці стінки резервуару, яка контактувала лише з нафтою, а найменший — найнижчій ділянці стінки резервуару, що зазнає сумісного впливу корозійно-агресивного середовища (підтоварної води) та механічного навантаження. Аналогічні результати отримано і при дослідженні сталі типу 10ГС, у експлуатованого 30 років магістрального нафтопроводу, в процесі експлуатації якого на дні труби також збирається підтоварна вода. За наявності відкладів, їх розтріскування та відшарування вода зберігається у щілинах навіть за транспортування нафти. Показано, що найвища ударна в'язкість властива сталі у вихідному стані (таблиця). Вдвічі менше значення KCV властиве верхній ділянці труби, що контактує тільки з нафтою. Що стосується ділянки «низ», то визначити кількісно ударну в'язкість було неможливо: у всіх випадках руйнування переорієнтовується вздовж дотичної труби. Слід підкреслити, що падіння KCV експлуатованого металу корелює із збільшенням в ньому вмісту водню (таблиця). Отже, слід розрізняти не тільки

Концентрація водню C_H та ударна в'язкість KCV сталі нафтопроводу у вихідному стані та після тривалої експлуатації

Матеріал	C_H , ppm	KCV , Дж/см ²
Вихідний стан	1,6	180
Експлуатована труба:		
верх	2,6	95
низ	3,4	Розшарування



матеріал у вихідному стані та після експлуатації, але і низ та верх експлуатованої труби. Оскільки водень не впливає на механічні властивості сталей за їх швидкого навантаження, то цей ефект можна пов'язувати тільки з мікропошкодженням, викликаною тривалою сумісною дією експлуатаційних навантажень і абсорбованого водню.

Отже, корозійне середовище за постійного його контакту із напруженим металом інтенсифікує експлуатаційну деградацію, оскільки воно виступає як наводнювальний чинник. Тобто, метал абсорбує водень, що виділяється як продукт корозійних реакцій впродовж тривалої експлуатації. Можна припустити, що друга стадія деградації — розвиток пошкодженості — починається за умови досягнення критичної концентрації водню.

Оцінювання експлуатаційної деградації за зміною електрохімічних властивостей. Експлуатаційна деградація актуалізує проблему оцінювання робоздатності відповідальних об'єктів, оскільки для коректного визначення їх залишкового ресурсу необхідно також знати, як змінилися властивості металу і які з них можуть слугувати показниками/критеріями деградації.

Для вивчення деградації металу застосовують структурно-чутливі фізичні методи дослідження: внутрішнє тертя, коерцитивну силу [3], питомий опір, модуль нормальної пружності [4]. Однак більшість із наведених вище методів орієнтовані на оцінку інтегральних властивостей всього об'єму металу, тоді як структурні зміни, ріст внутрішніх напружень і розвиток мікропошкодженості протікають в локальних його об'ємах, що, як пра-

вило, обумовлює їх низьку чутливість. Інші методи, наприклад, внутрішнього тертя, не технологічні для використання в експлуатаційних умовах. Стосовно оцінювання пошкодженості ряд методів наведено в огляді [11]. Виділимо серед них метод, який базується на визначенні параметрів розсіювання значень твердості, а також акустичної емісії і кінетичної твердості [1].

Що стосується електрохімічних характеристик, то вони використовуються традиційно як показники корозійної тривкості матеріалу у певному корозивному середовищі та для встановлення механізму корозійного процесу. Відомо, що вони чутливі до структурного та напруженого стану металу [12]. Отже, використання електрохімічних показників може мати перспективи для оцінювання деградації властивостей матеріалу: як у лабораторних умовах, так і для технічного діагностування стану матеріалів конструкцій, що тривало експлуатуються.

До електрохімічних показників, які потенційно можна використовувати для цієї мети, можуть належати потенціал корозії $E_{\text{кор}}$, коефіцієнти Тафеля анодної b_a і катодної b_c реакцій, струм корозії і струм за певного анодного потенціалу $j_{\text{кор}}$ і j_a відповідно, та поляризаційний опір R_p . На рис. 2 наведено приклади відносної зміни цих показників для ряду конструкційних сплавів, якщо порівнювати вихідний і експлуатований стани. Виявилось, що поляризаційний опір і струм корозії є найбільш чутливими до їх експлуатаційної деградації (рис. 2, а-з).

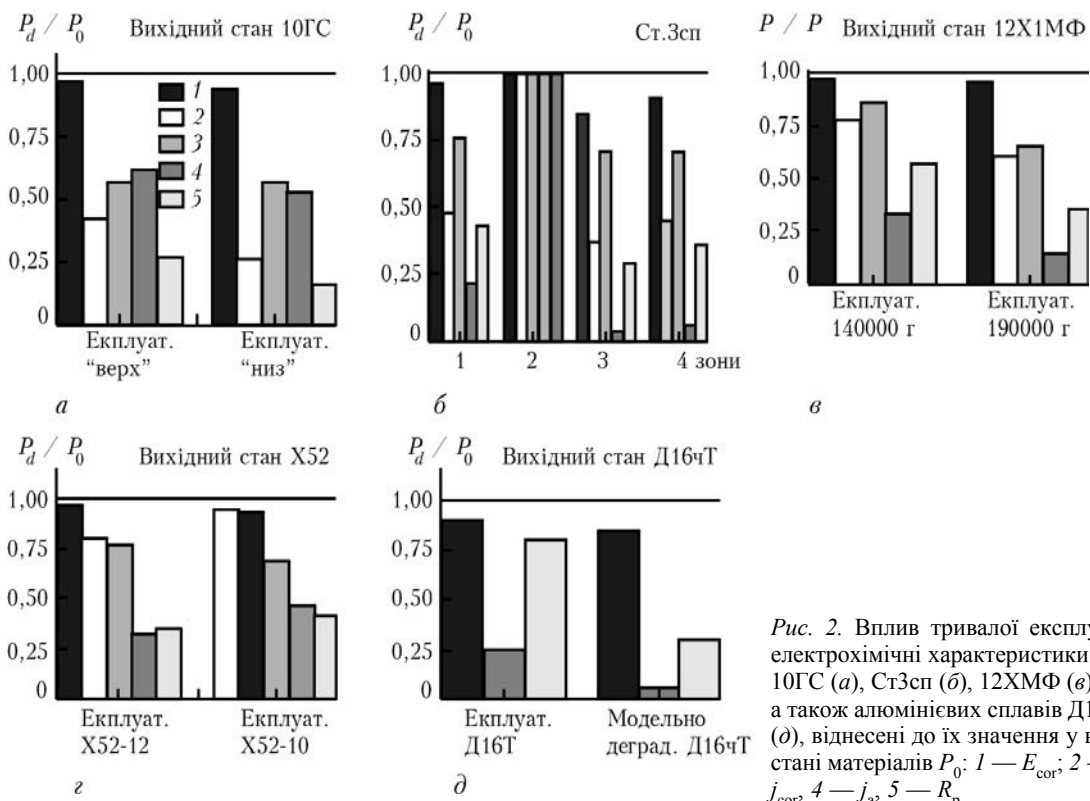


Рис. 2. Вплив тривалої експлуатації на електрохімічні характеристики P_d сталей 10ГС (а), Ст3сп (б), 12ХМФ (в) і Х52 (г), а також алюмінієвих сплавів Д16чТ(Д16) (д), віднесені до їх значення у вихідному стані матеріалів P_0 : 1 — $E_{\text{кор}}$; 2 — b_a ; 3 — $j_{\text{кор}}$; 4 — j_a ; 5 — R_p

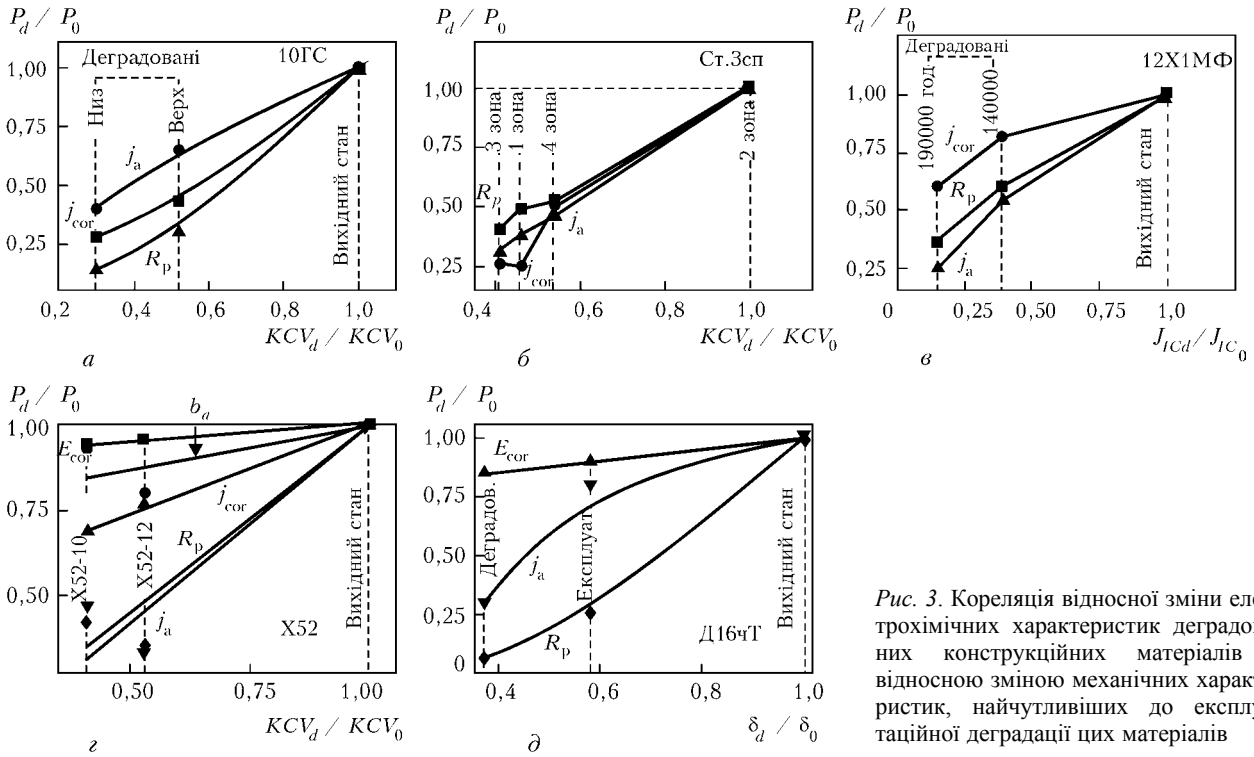


Рис. 3. Кореляція відносної зміни електрохімічних характеристик деградованих конструкційних матеріалів з відносною зміною механічних характеристик, найчутливіших до експлуатаційної деградації цих матеріалів

Зазначимо, що електрохімічні методи оцінювання деградації матеріалів можна застосовувати і у випадку його експлуатації в неактивному середовищі, якщо вона зумовлює зміну стану матеріалу. Важливе також питання вибору корозивного середовища для оцінювання деградації матеріалів. У випадку експлуатації матеріалу у певному технологічному середовищі це ще не означає, що саме його слід використовувати при електрохімічних вимірюваннях, оскільки перевагу можуть мати інші модельні середовища, які забезпечать вищу чутливість в оцінюванні деградації. При виборі середовища для електрохімічних вимірювань необхідно враховувати ту обставину, що в результаті взаємодії поверхні з електролітом утворюються, як правило, поверхневі плівки з певними бар'єрними властивостями. Стан цих плівок може змінюватися в часі такої взаємодії. Тоді виміряні електрохімічні параметри будуть відбивати також і стан поверхневої плівки, а це буде спотворювати електрохімічний відклик на зміну стану самого матеріалу в результаті його експлуатації.

Особливо гостра проблема екрануючого впливу фазових поверхневих плівок, наприклад, на алюмінієвих сплавах. У цьому випадку пропонується використовувати методику дослідження, за якою спочатку катодно відновлюються пасивні оксидні плівки з наступною поляризацією в анодний бік [9]. Висока швидкість поляризації дає можливість оцінити кінетику і термодинаміку електродних процесів за нестационарних умов, коли поверхневі плівки тільки починають формуватися. Для авіаційних алюмінієвих сплавів пока-

зано, що практично всі електрохімічні властивості змінюються внаслідок експлуатаційної деградації. Проте найчутливіші до деградації виявились поляризаційний опір та струм пасивації. Перспективним для оцінювання деградації є також потенціал E_0 катодно-анодного переходу після катодного відновлення пасивних плівок (рис. 2, д).

З огляду на попередні дослідження поведінки водню [6, 7] перспективними можуть бути електрохімічні методи оцінки глибини водневих пассток за кінетикою окислення десорбованого водню після попереднього електролітичного наводнювання, а також критичного струму наводнювання, який відбиває чутливість матеріалу до розвитку пошкодженості в результаті сумісної дії напружень та абсорбованого металом водню.

Порівняння зміни внаслідок тривалої експлуатації, з одного боку, механічних властивостей різних відповідальних конструкцій, а з іншого — їх електрохімічних характеристик, вказує на чітку кореляцію між ними (рис. 3). Якщо оцінювати ці електрохімічні характеристики на практиці, то таку кореляцію можна використати для розроблення відповідного методу НК стану металу. Він доповнюватиме відомі методи діагностування дефектності експлуатованих конструкцій на макрорівні (утонення, виразки, тріщини тощо) і в той же час, що не менш важливо, слугуватиме індикатором розвитку розсіяної пошкодженості на мікрорівні, яка різко понижує опір зародженню та поширенню макродефектів і підвищує ризик важкопрогнозованого крихкого руйнування експлуатованих конструкцій.



Висновки

При експлуатації сталей резервуарів для зберігання нафти, магістральних нафто- і газопроводів, а також авіаційних алюмінієвих сплавів погіршуються практично всі їх механічні та електрохімічні властивості. Однак найчутливіші до експлуатаційної деградації характеристики пластичності і опору крихкому руйнуванню, а з електрохімічних — поляризаційний опір і струм корозії.

Порівняння властивостей сплавів у вихідному стані та після їх тривалої експлуатації вказує на чітку кореляцію між механічними і електрохімічними властивостями. Такі залежності можна використати для розробки відповідного методу НК стану експлуатованого металу.

При експлуатації сталей нефтяних резервуаров, магістральних нефте- и газопроводов, а также авиационных алюминиевых сплавов ухудшаются практически все их механические характеристики. Однако наиболее чувствительны к эксплуатационной деградации характеристики пластичности и сопротивления хрупкому разрушению. Предложено рассматривать, в общем случае, две стадии процесса деградации: стадию деформационного старения и стадию развития рассеянной повреждаемости (после 10-20 лет эксплуатации). Развитие микроповреждаемости эксплуатируемых сталей обусловлено длительным воздействием эксплуатационных нагрузок и абсорбированного водорода, продукта коррозионного взаимодействия металла с рабочими средами. На это указывает высшая концентрация остаточного водорода в деградированном металле, в сравнении с исходным (таблица). Из всех исследованных электрохимических характеристик наиболее чувствительны к эксплуатационной деградации поляризационное сопротивление и ток коррозии (рис. 2). Сравнение свойств исследованных сплавов в исходном состоянии и после их длительной эксплуатации, с одной стороны, механических, а с другой — электрохимических, указывает на четкую корреляцию между ними (рис. 3). Если оценивать электрохимические характеристики на практике, то такую корреляцию можно использовать для разработки соответственного метода неразру-

шающего контроля состояния металла. Он будет дополнять известные методы диагностирования дефектности эксплуатируемых конструкций на макроуровне (утонение, язвы, трещины и т.п.), поскольку будет служить индикатором развития рассеянной повреждаемости на микроуровне, которая резко повышает риск тяжело прогнозируемого хрупкого разрушения эксплуатируемых конструкций.

1. Пенкин А. Г., Терентьев В. Ф., Маслов Л. Г. Оценка степени деградации механических свойств и остаточного ресурса работоспособности трубных сталей с использованием методов акустической эмиссии и кинетической твердости // www.sds.ru/articles/degradation, 2004.
2. Krasowsky A. Y., Dolgiy A. A., Torop V. M. Charpy testing to estimate pipeline steel degradation after 30 years of operation // Proc. «Charpy Centary Conference», Poitiers. — 2001, Vol. 1. — P. 489–495.
3. Изменение структуры и свойств трубной стали во время длительных выдержек под нагрузкой / С. И. Ильин, М. А. Смирнов, Ю. И. Пашков и др. // Изв. Челябинского научного центра. Сер. Физическая химия и технология неорганических материалов. — 2002. — Вып. 4. — С. 42–46.
4. Работоспособность трубопроводов. Сопrotивляемость разрушению. Часть 2 / Г. А. Ланчаков, Е. Е. Зорин, Ю. И. Пашков, А. И. Степаненко. — М.: Недра, 2001. — 350 с.
5. Роль підварної води в корозійно-водневій деградації сталі магістрального нафтопроводу / Г. М. Никифорчин, З. В. Слободян, О. Т. Цирульник та ін. // Матеріали 8-ї Міжнар. наук.-практ. конф. «Нафта і газ України — 2004», Київ, 2004. — С. 165–166.
6. In-service degradation of gas trunk pipeline X52 steel / G. Gabetta, H. M. Nykyforchyn, E. Lunarska et al. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. — 2008. — № 1. — С. 88–99.
7. Corrosion and stress corrosion cracking of exploited storage tank steel / A. Zagorski, H. Matysiak, O. Tsyulnyk et al. // Te same. — 2004. — № 3. — С. 113–117.
8. Nykyforchyn H. M., Student O. Z. Assessment of high-temperature hydrogen degradation of power equipment steels // Proc. 16-th European Conf. of Fracture «Fracture of Nano and Engineering Materials and Structures». — Alexandroupolis: Springer, 2006. — P. 1011–1012.
9. Electrochemical estimation of in-service degradation of the aircraft aluminum alloys / H.M. Nykyforchyn, O. P. Ostash, O. T. Tsyulnyk et al. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. — 2008. — № 2. — С. 254–259.
10. Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідниковий посібник / Під заг. ред. В. В. Панасюка. — 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.
11. Лебедев А. А. Новые характеристики деградации материала на стадии развития рассеянных повреждений // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2008. — № 4. — С. 35–44.
12. Коррозия: Справочник. Пер. с англ. / Под ред. Л. Л. Шрайера. — М.: Металлургия, 1981. — 632 с.



ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ДЕФЕКТОСКОПИИ ПРОТЯЖЕННЫХ ТРУБОПРОВОДОВ НИЗКОЧАСТОТНЫМИ НАПРАВЛЕННЫМИ ВОЛНАМИ

А. И. БОНДАРЕНКО

Выполнена оценка величины амплитуды отраженных сигналов от несплошностей типа коррозионных поражений стенки трубы при контроле трубопроводов низкочастотными направленными волнами. Рассмотрены вопросы чувствительности систем УЗК трубопроводов, оценки дефектности пораженных коррозией труб при контроле протяженных трубопроводов.

The amplitude value of signals reflected from discontinuities of the type of corrosion damage of pipe wall was performed in pipeline testing by low-frequency directional waves. Considered are the questions of sensitivity of pipeline UT systems, assessment of defectiveness of corroded pipes at testing of extended pipelines.

В настоящее время во всем мире резко повысился объем исследований и разработок в области технологии и техники дистанционной дефектоскопии технического состояния протяженных трубопроводов. Существенным прогрессом в развитии дистанционной дефектоскопии протяженных трубопроводов явилось развитие технологии с использованием метода дальнедействующего низкочастотного ультразвукового контроля (НЧ УЗК) направленными волнами. Основной задачей такой технологии является диагностика технического состояния трубопроводов различного назначения путем выявления уже в начальной стадии коррозионных поражений и эрозионного износа стенок труб.

Наибольшее развитие технология контроля трубопроводов различного назначения получила в середине 1990-х годов в Англии [1], США [2], а затем в Японии [3]. Анализ особенностей распространения НЧ УЗК направленных волн, систем диагностики трубопроводов различного назначения с использованием разных видов преобразователей для возбуждения направленных волн продольной и крутильной мод и приема отраженных эхо-сигналов от несплошностей в трубопроводах приведен в работе [4].

Адаптация адекватного метода контроля и мониторинга технического состояния протяженных трубопроводов, каким является метод дальнедействующего НЧ УЗК направленными волнами, имеет большое значение для снижения потерь потенциально опасных продуктов, которые транспортируются по этим трубопроводам. В связи с увеличением объема транспортируемых продуктов потребность в таком добротном контроле будет со временем только возрастать. Большим преимуществом НЧ УЗК направленными волнами

является возможность 100%-го охвата при контроле стенок труб по всей длине диагностируемого участка трубопровода [5].

Рассмотрим основные технологические особенности метода НЧ УЗК направленными волнами, связанные с его возможностями по выявлению коррозионных поражений стенки трубы при диагностике и мониторингу технического состояния трубопроводов в процессе эксплуатации.

Виды отражателей в трубопроводах. Характерной особенностью протяженных трубопроводов является наличие в них различного рода несплошностей, связанных с изменением плотности материала и/или поперечного сечения стенок труб на границе их соединения и/или по длине трубы. Такие несплошности являются отражателями ультразвуковых направленных волн, которые распространяются вдоль осевой линии трубы. На рис. 1 приведена классификация видов отражателей в трубопроводе и схема их возможного размещения на трубе.

Все отражатели в трубопроводе можно разделить на два вида: симметричные и асимметричные. К симметричным относятся сварные швы, фланцы, опоры, патрубки и т. п., местоположение которых на трубопроводе известно согласно технической документации. Эхо-сигналы от симметричных отражателей являются важными метками для определения местоположения асимметричных отражателей. К асимметричным отражателям относятся дефектные участки трубы, обусловленные чаще всего повреждениями поперечного сечения стенки трубы из-за коррозии и эрозионного износа стенки трубы и расположенные по траектории распространения направленной волны. Коррозионные поражения стенки трубы ориентированы как вдоль окружности трубы, так и вдоль продольной оси трубы. Они могут находиться на внутренних и наружных поверх-

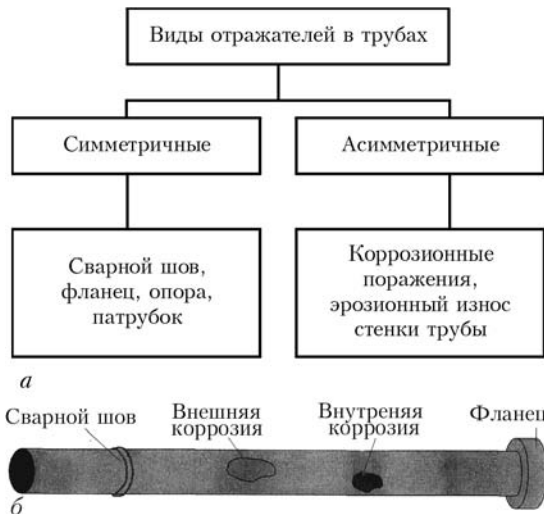


Рис. 1. Классификация видов отражателей в трубопроводе (а) и схема их возможного размещения на трубе (б)

ностях, однако распознать какая именно это поверхность с помощью дистанционного ультразвукового контроля невозможно. Повреждения, обусловленные эрозионным износом стенки трубы, чаще всего ориентированы вдоль продольной оси трубы и расположены со стороны внутренней поверхности. Асимметричные отражатели могут располагаться в различных местах трубы. Для идентификации их местоположения вдоль трубы служат эхо-сигналы от симметричных отражателей. При наличии дефектов в сварном шве, обусловленных деформацией формы шва и коррозионным поражением, они будут идентифицироваться синхронно со сварным швом.

Оценка амплитуды отраженных эхо-сигналов. Отраженные эхо-сигналы НЧ УЗ направленных волн в трубопроводе образуются вследствие изменения механического импеданса контролируемой трубы, которое возникает из-за влияния различных несплошностей на этот импеданс. Так, коррозионное поражение или эрозионный износ приводят к изменению площади поперечного сечения стенки трубы. При этом изменяется акустическое сопротивление трубы, которое показывает, по сути, степень сопротивления распространению ультразвуковых волн. Если при движении УЗ волна доходит до изменения сечения трубы, то определенная часть энергии падающей волны отражается к преобразователям. Для трубопровода из одинаковых материалов, когда плотность материала и скорость распространения волны не изменяются, акустический импеданс будет зависеть только от площади поперечного сечения трубы. В работе [6] получены выражения для определения коэффициентов отражения и прохождения по амплитуде падающей волны A_1 на границе изменения поперечного сечения трубы вследствие наличия в трубопроводе симметричных и асимметричных отражателей. Оценим за-

висимость амплитуды отраженной и прошедшей волн от степени изменения поперечного сечения трубы из-за действия коррозии. С учетом приведенных в работе [6] выражений (17) и (18) для определения коэффициентов отражения R и прохождения W направленной волны на границе изменения поперечного сечения стенки трубы вследствие ее коррозионного поражения, амплитуды отраженной B_1 и прошедшей A_2 волн будут определяться формулами вида:

$$B_1 = RA_1 = \frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2} A_1, \quad (1)$$

$$A_2 = WA_1 = \frac{2S_1}{S_1 + S_2} A_1. \quad (2)$$

Из выражения (1) видно, что амплитуда отраженной волны пропорциональна разности площадей $S_1 - S_2$, т. е. зависит от размеров пораженной коррозией площади поперечного сечения стенки трубы. Это значит, что низкочастотная направленная волна чувствительна к потерям металла в поперечном сечении трубы. Из выражения (1) также следует, что коэффициент отражения по амплитуде, обусловленный скачком поперечного сечения трубы из-за наличия дефекта, значительно меньше, чем отношение поперечных сечений S_2/S_1 . Поэтому направленная волна распространяется дальше вдоль трубы и только небольшая ее часть отражается от скачка поперечного сечения трубы.

Если принять, что поперечные сечения в месте дефекта отличаются в два раза, т. е. $S_2 = S_1/2$, то амплитуда отраженной волны B_1 будет равна:

$$B_1 = \frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2} A_1 = \frac{S_1/2}{3S_1/2} A_1 = \frac{1}{3} A_1. \quad (3)$$

В этом случае амплитуда прошедшей волны A_2 будет равна:

$$A_2 = \frac{2S_1}{S_1 + S_2} A_1 = \frac{2S_1}{3S_1/2} A_1 = \frac{4}{3} A_1. \quad (4)$$

Оценим, какая часть энергии возбужденной волны отражается при соотношении сечений $S_2 = S_1/2$. Известно [7], что коэффициент отражения R_3 падающей плоской звуковой волны на границе изменения поперечного сечения объекта с одинаковыми материальными постоянными, оцениваемый по энергии, равен:

$$R_3 = \left(\frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2} \right)^2. \quad (5)$$

В общем случае это означает, что только небольшая часть энергии звуковой волны отражается от дефекта обратно, а значительная часть



энергии проходит дальше по трубе. Для соотношения сечений трубы $S_2 = S_1/2$ из выражения (3) значение отраженной энергии звуковой волны будет равно:

$$\left(\frac{B_1}{A_1}\right)^2 = \left(\frac{1}{3}\right)^2 = \frac{1}{9}. \quad (6)$$

Из выражения (6) следует, что если сечения доброкачественной и пораженной дефектом трубы отличаются в два раза, то только 1/9 часть падающей энергии отражается обратно. При этом, согласно данным работы [8], удовлетворяется закон сохранения энергии: разность энергий падающей и отраженной волны должна быть равна энергии прошедшей волны. Поскольку плотность энергии пропорциональна квадрату амплитуды, то выполняется следующее соотношение:

$$S_1(A_1^2 - B_1^2) = A_2^2 S_2. \quad (7)$$

Хотя только незначительная часть энергии звуковой волны отражается обратно от дефектов, амплитуда отраженного эхо-сигнала является основным параметром, положенным в основу создания систем НЧ УЗК направленными волнами.

Высота отраженных эхо-сигналов, по сути, соответствует степени изменения площади поперечного сечения трубы под действием коррозии, т. е. зависит от размера дефекта. При увеличении размера дефекта увеличивается также длительность (ширина) эхо-сигнала. Соответствие амплитуды отраженных сигналов степени изменения площади поперечного сечения трубы из-за действия коррозии является фундаментальной технологической особенностью дефектоскопии протяженных трубопроводов низкочастотными направленными волнами, которые распространяются по толщине стенки трубы вдоль ее продольной оси. Таким образом, достоверно подтвердить наличие (отсутствие) повреждений может только соответствующая форма принимаемых отраженных сигналов. Однако точно определить размеры повреждения, его тип, степень опасности и т. п. почти невозможно, даже если известно его местоположение по длине трубы.

Чувствительность технологии НЧ УЗК. В процессе развития технологии дальнедействующего УЗК направленными волнами основной целью была демонстрация чувствительности метода при определении внешней коррозии под изоляцией и внутренней коррозии в трубе протяженных трубопроводов. Исследования проводили на системных трубопроводах с изоляцией и технологических трубопроводах диаметром 50... 300 мм [1, 9], при передаче газа по трубам большого диаметра [10]. Минимально требуемой чувствительностью было определение коррозии на глубину

50 % толщины стенки, а также области $D/2 \times D/2$ (D — диаметр трубы), что составляло приблизительно 9 % площади поперечного сечения трубы на расстоянии не менее 15 м от места установки преобразователей акустической антенны. Поскольку коррозию можно рассматривать как глубокие выемки небольшой площади, то в процессе исследований ставилась также задача проверить чувствительность метода при определении коррозии глубиной 50 % толщины стенки и области $3t \times 3t$ (t — толщина стенки), что составляло приблизительно 3 % площади поперечного сечения стенки трубы.

Исследования и испытания, основанные на моделировании с использованием различных моделей несплошностей, показали, что распространяющиеся в трубах направленные волны могут быть использованы для определения коррозионного поражения трубопроводных систем различного назначения.

В работе [11] приведены результаты теоретических и практических исследований для определения отражений от потерь поперечного сечения трубы диаметром 76 мм. Частота возбуждаемого сигнала составляла 70 кГц. При исследовании использовали искусственные дефекты в виде паза 50 % толщины стенки как функция длины окружности и паза шириной больше 11 % длины окружности как функция глубины дефекта. Затем эти исследования были расширены и на больший размерный диапазон дефектов, обеспечивая, таким образом, пакет данных о найденных отражениях. На рис. 2 приведена зависимость между амплитудой отраженного сигнала и площадью дефекта как пропорцией поперечного сечения стенки трубы.

Из рисунка видно, что не все точки, соответствующие амплитуде отраженного сигнала при одной и той же площади дефекта, лежат на средней линии. Было высказано предположение, что глубокие дефекты с малой длиной по окружности трубы дают большее отражение, чем длинные по окружности, но неглубокие той же площади. Это теоретическое предположение было экспериментально проведено на трубах диаметром 76 и 200 мм, содержащих искусственные дефекты в виде пазов известных площадей поперечного сечения. В большинстве случаев практические результаты были близки к прогнозируемым, поэтому приведенная на рис. 2 зависимость была использована как база для описания чувствительности метода УЗК направленными волнами в системе Teletest [11]. Из зависимости рис. 2 видно, что в диапазоне от 10 до 50 % площади пораженного дефектом поперечного сечения трубы кривая чувствительности изменяется более плавно. В диапазоне от 3 до 9 % чувствительность метода проявляется сильнее.

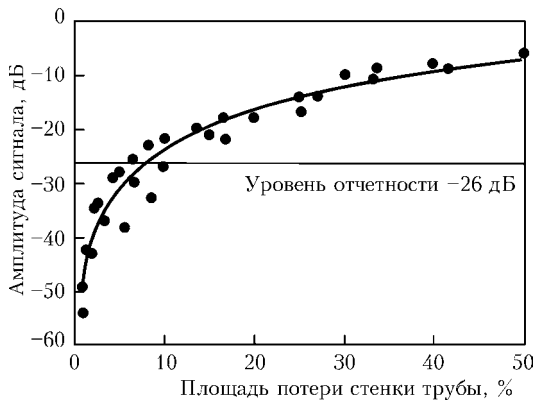


Рис. 2. Зависимость амплитуды отраженного сигнала от площади потерь металла (кружочки — отражения от дефектов; кривая — наилучшая сходимость зависимости)

Подтверждения о возможности с помощью длинноволнового УЗК обнаруживать небольшие потери металла на уровне 3 % поперечного сечения трубы приведены в более ранней работе [1]. В работе [12] также подтверждается возможность приема отраженного эхо-сигнала от реального эталонного отражателя на уровне 4 % дефектности поперечного сечения трубы. Поэтому в системе Teletest в качестве протоколируемого уровня отраженного эхо-сигнала была принята амплитуда, соответствующая 9 % площади поперечного сечения трубы. Если четкие индикации обнаруживаются ниже протоколируемого уровня, их определяют как малые дефекты.

Подтверждение выбранных порогов системы Teletest осуществлялось путем проведения исследовательских работ по европейскому проекту RACH, возглавляемому Лондонским университетом [13]. Основная часть работы состояла в сборе данных о неразрушающем контроле (НК) образцов труб, пораженных коррозией, с использованием восьми методов НК для сравнения их способности обнаружения дефектов. Испытания проводили «вслепую», без знания существующих дефектов. Оценка результатов исследований осуществлялась независимой группой из Бюро Veritas (Париж). На рис. 3 приведены результаты оценки 36 разных дефектов для труб диаметром 150 мм. График построен в виде зависимости глубины поражения дефектами стенки трубы от длины по окружности и показывает обнаруженные и не обнаруженные дефекты. Кривые отражают дефекты на уровне 3 и 9 % площади поперечного сечения трубы.

Графики на рис. 3 показывают, что при «слепых» условиях контроля система Teletest работает как ожидалось. Очевидно ограниченное обнаружение дефектов при 3 % уровне и ниже его. Данные показывают классическую вероятность характеристик обнаружения, которая увеличивается в области выше уровня, соответствующего 3 % поперечного сечения трубы. Все контролируемые

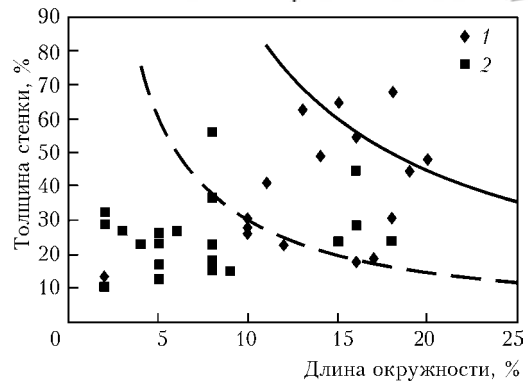


Рис. 3. Результаты выявления дефектов системой Teletest как зависимости глубины поражения стенки трубы от длины по окружности: 1 — обнаруженные; 2 — не обнаруженные дефекты; сплошная линия — граница 9%-й зоны; штриховая — 3%-й зоны

дефекты вокруг и выше 9 % уровня были обнаружены. Эти результаты очень важны, так как они демонстрируют возможности работы системы Teletest на известных образцах с известными дефектами и могут быть воспроизведены при проведении диагностики трубопроводов с коррозией в неизвестных местах.

Такие же исследования были проведены на трубах диаметром 600 мм (толщина стенки 8,74 мм) на 86 видах моделей дефектов, выполненных механическим путем [14]. В этом случае были обнаружены дефекты значительно ниже кривой 9 % площади поперечного сечения трубы, а также дефекты ниже, чем 3 % площади. Результаты этих исследований показали, что в случае трубы с большим диаметром минимальная чувствительность к обнаружению потерь металла стенок, эквивалентная 9 % площади поперечного сечения, выше, а практическая цель обследования 3%-й площади стенки трубы была достигнута для большинства случаев. Как следует из работы [11], чувствительность к дефектам выше на линиях больших диаметров труб, когда отношение диаметра к толщине стенки трубы намного больше, чем при малых диаметрах труб. Однако на трубах большого диаметра достаточно сложно обнаружить небольшие отдельные участки коррозии, так как размер каждого коррозионного поражения не пропорционален внутреннему диаметру трубы [14].

Наиболее важным является то, что метод и технология НЧ УЗК является методом качественной дистанционной визуализации местоположения дефектов и чувствителен к уменьшению поперечного сечения трубы, т. е. к любым потерям металла в комбинации глубины и длины по окружности трубы из-за коррозионного поражения или эрозийного износа. Это достигается благодаря передаче круговой волны вдоль стенки трубы, которая взаимодействует с поперечным сечением в каждой точке. При этом технология НЧ УЗК в



равной степени чувствительна к дефектам на внутренней и внешней поверхностях трубы. Однако пораженная часть стенки трубы плохо обнаруживается дальнедействующим методом в направлении осевой линии трубы. Это объясняется тем, что направленная волна при распространении ударяется в границу изменения сечения трубы и сразу же отражается, хотя от длинного дефекта в направлении осевой линии трубы может отразиться более сильный сигнал, чем от короткого при условии достаточно большого размера окружности трубы [11]. В то же время длинные дефекты в осевом направлении трубы могут привести к снижению прочности трубы.

Представление информации о несплошностях в системах НЧ УЗК. Приведенные выше результаты практических исследований чувствительности НЧ направленных волн при отражении от различных дефектов были использованы как база для создания технологии Teletest [15]. Teletest — это технология дистанционного НК, которая представляет собой эхо-импульсную систему для контроля больших объемов материала из одной точки установки преобразователей. Направленные волны, отраженные от дефекта, принимаются пьезопреобразователями и после усиления, обработки и подавления помех выводятся на экран персонального компьютера как выпрямленные сигналы в виде A-scan зависимости амплитуды от расстояния, подобно используемым при обычном ультразвуковом контроле, но во временном диапазоне измерения, соответствующем десяткам метров, а не сантиметров. Так как направленные волны носят дисперсионный характер, то при калибровке временной шкалы A-scan для считывания расстояния, а не времени, в системе Teletest имеется компьютерная программа определения скорости распространения волны для выбранной частоты испытаний из калибровочной или «дисперсионной» кривой. В программное обеспечение Teletest встроена библиотека дисперсионных кри-

вых, которые имеют разный вид в зависимости от сочетания «диаметр трубы/толщина стенки». Обычно на дисплей наложены кривые коррективы «расстояние — амплитуда», предназначенные для временной регулировки чувствительности и отображающие линии равной чувствительности при равном расстоянии от преобразователей.

На рис. 4 приведен формат дисплея системы Teletest [15] для трубы длиной 36 м, который подобен дисплею обычного УЗК. По горизонтали — расстояние от преобразователей или начала отсчета, по вертикали — амплитуда отраженного сигнала. Дисплей A-scan используется оператором для интерпретации результатов контроля. На A-scan системы Teletest выведены четыре кривые коррективы «расстояние — амплитуда»:

кривая 1 (0 дБ). Конец трубы или фланец играет роль почти идеального отражателя. Это можно продемонстрировать на единичном отрезке трубы в лаборатории и использовать для установки абсолютной стандартной чувствительности. Эту эталонную величину обычно называют отражатель 0 дБ;

кривая 2 (–14 дБ). Сигналы от кольцевых сварных швов на трубе, которые постепенно затухают с расстоянием, образуют идеальные отражатели для задания кривой коррективы. Опыт использования системы Teletest показывает, что кольцевой шов с обычным профилем верхнего и корневого прохода имеет отражательную способность, эквивалентную до 20 % (–14 дБ) сигнала от конца трубы. Пока существуют небольшие колебания от шва к шву, это положение хорошо подтверждается на практике;

кривая 3 (–26 дБ). Явление потери металла с площадью поперечного сечения, эквивалентной до 9 % поперечного сечения стенки трубы имеет отражательную способность, эквивалентную до 5 % (–26 дБ) отражения от конца трубы. Этот пороговый уровень, видимый на A-scan в качестве кривой 3, используется для определения аномалий. Аномалии, которые дают сигналы, близкие, но не превышающие кривую –26 дБ, обычно рассматриваются как незначительные, превышающие кривую –26 дБ, описываются как умеренные, значительно превышающие кривую –26 дБ (настолько, что они достигают линии –14 дБ), рассматриваются как серьезные;

кривая 4 (–32 дБ). Кривая 4 используется как детерминанта эффективного диапазона тестирования. Это позволяет выявляемой аномалии (–26 дБ) иметь коэффициент сигнал-шум 6 дБ или лучше. Такой уровень отношения сигнала к шуму необходим для эффективной интерпретации данных теста и практически играет роль предела как диапазона

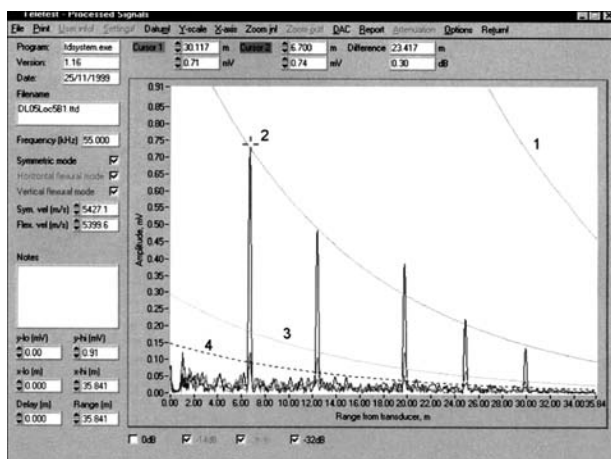


Рис. 4. Формат дисплея A-scan системы Teletest для трубы длиной 36 м

тестирования, так и чувствительности к меньшим аномалиям.

На дисплее ниже уровня -26 дБ записаны наложенные друг на друга три кривые, принцип образования которых при отражении направленной волны от симметричных и асимметричных отражателей приведен на рис. 5.

Основная кривая — это прямоотраженный (продольная $L(0,2)$ мода) сигнал от несплошностей. Если сварной шов трубопровода является симметричным относительно трубы, то отраженный сигнал состоит из той же волновой моды, которая распространяется по трубопроводу. Наличие дефектов типа коррозионного поражения стенки трубы приводит к преобразованию (конвертации) направленной волны. Это значит, что отраженная волна будет состоять из моды падающей продольной волны и конвертированной (изгибной) волны, так как последние вызывают изгиб трубы вследствие их возникновения от неоднородного источника. Наличие таких отраженных эхо-сигналов является явным свидетельством присутствия в стенке трубы таких несплошностей, как коррозия. Приведенные на дисплее (рис. 4) две другие кривые являются вертикальной и горизонтальной компонентами мод конвертированных сигналов, образующихся, когда продольная мода отражается от шероховатых и/или асимметричных несплошностей. Наличие уровней амплитуд (выше 9 %) мод конвертированных сигналов означает наличие дефектов и является главным фактором процесса их интерпретации в протяженных трубопроводах. Для интерпретации дефектов по отраженным эхо-сигналам оператор выбирает соответствующие сигналы на экране А-scan при помощи курсора. Программа автоматически измеряет пик сигнала как значение выше или ниже кривой корректировки — 26 дБ и расстояние до переднего края эхо-сигнала от центра линии преобразователей.

Оценка дефектности пораженных коррозией труб. Анализ изложенных выше исследований амплитуды эхо-сигналов, отраженных от реальных дефектов и искусственных моделей дефектов, дает возможность в некоторой степени судить о глубине поражения стенки трубы в зависимости от изменения площади поперечного сечения трубы [11]. Однако эта технология не обеспечивает такого разрешения как измеренная по месту оставшаяся толщина стенки трубы, пораженная дефектом.

Высота отраженных эхо-сигналов от дефектов соответствует степени изменения площади поперечного сечения трубы под действием коррозии. Эта информация о дефектах определяется ультразвуковыми направленными волнами, которые распространяются вдоль продольной оси трубы. Амплитуда отраженного от дефекта сигнала ха-

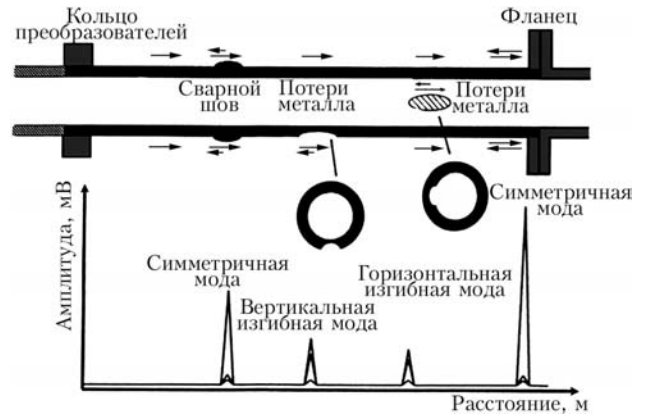


Рис. 5. Принцип отражения направленной волны от симметричных и асимметричных отражателей

рактеризует степень дефектности поперечного сечения трубы. Степень дефектности D определяется по цилиндрическому сечению трубы в процентном отношении площади дефекта S_d по всей площади поперечного сечения трубы $S_{тр}$, т. е.

$$D = \frac{S_d}{S_{тр}} 100 \%. \quad (8)$$

Информация о толщине стенки трубы определяется при ультразвуковом измерении толщины. При этом ультразвуковые волны направлены по толщине перпендикулярно оси трубы. Поэтому в информацию об амплитуде отраженного эхо-сигнала направленной волны не входит глубина коррозии, которая в принципе является информацией, получаемой по толщине. Глубина коррозии характеризует степень H утонения стенки трубы, которая определяется в процентном отношении глубины коррозии h к номинальной толщине t стенки трубы, т. е.

$$H = \frac{h}{t} 100 \%. \quad (9)$$

Прямой корреляционной зависимости между данными о дефектах, полученными направленными волнами, и данными о глубине утонения, полученными при измерении толщины стенки, нет. Покажем это на примере поражения коррозией поперечного сечения трубы равной площади с различной глубиной.

На рис. 6 приведена схема поражения коррозией поперечного сечения трубы равной площади с различной глубиной со стороны внутренней поверхности трубы.

Примем, что площади пораженного дефектом сечения $S_{д1} = S_{д2} = S_{д3}$, а степень дефектности стенки трубы $D = 9 \%$. Применительно к трубе с наружным диаметром $d_n = 114$ мм и толщиной стенки $t = 6$ мм глубина утонения стенки при наличии равномерной коррозии по всему внутреннему диаметру трубы составит $h_1 = 0,54$ мм (рис. 6, а). Если предполагается концентрация

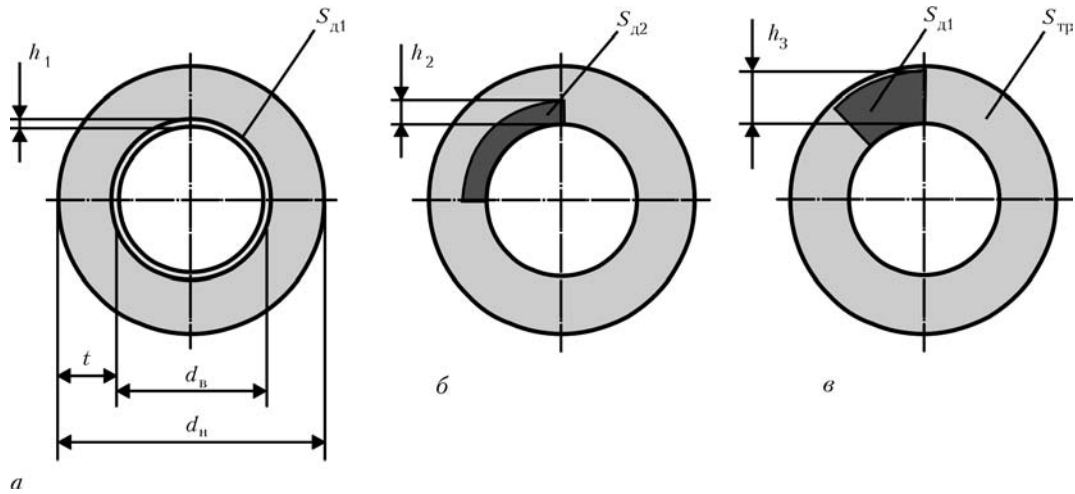


Рис. 6. Схема поражения коррозией внутренней поверхности трубы равной площади с различной глубиной

коррозии на 1/4 окружности трубы (рис. 6, б), тогда оценочное значение глубины утонения составит $h_2 = 2,16$ мм. При концентрации коррозии на 1/8 окружности трубы (рис. 6, в) значение глубины утонения будет $h_3 = 4,32$ мм.

Исходя из этого, нельзя утверждать, что существует прямая зависимость между площадью поражения поперечного сечения трубы и глубиной утонения стенки. Направленная волна в общем случае чувствительна к изменению площади поперечного сечения в комбинации глубины поражения стенки и длины вдоль окружности трубы, что и подтверждают исследования в работе [11]. Хотя глубокий дефект той же площади с малой длиной по окружности трубы может давать большее отражение, однако информацию о степени поражения площади поперечного сечения трубы амплитуда отраженного сигнала несет в целом и из этой информации невозможно обосновать информацию о глубине поражения стенки трубы. Такую информацию могут дать другие физические средства измерения стенки трубы, например, ультразвуковая толщинометрия. На рис. 7 приведена схема алгоритма оценки степени дефектности и утонения стенки поперечного сечения трубы.

Пусть коррозионное поражение стенки трубы выявлено длинноволновым ультразвуковым дефектоскопом, а глубина утонения стенки измерена ультразвуковым толщиномером. О наличии коррозионного поражения и степени поражения стенки трубы судят по амплитуде отраженного эхо-сигнала, которая измеряется в мВ. Такая оценка степени дефектности стенки трубы является качественной. Величина утонения (толщина) стенки трубы измеряется в мм, поэтому оценка степени утонения стенки трубы является количественной. Между этими величинами нет полной корреляции, так как измеряются разные физические параметры. Произвести оценку глубины утонения по амплитуде сигнала в некоторой степени можно,

если известен вид коррозии. Если же на практике вначале проводится первичный контроль трубопровода, выполнить это трудно. В дальнейшем такая связь может быть установлена в процессе мониторинга технического состояния трубопроводов в результате формирования картины развития коррозионных поражений, накопления и анализа фактических статистических данных о де-

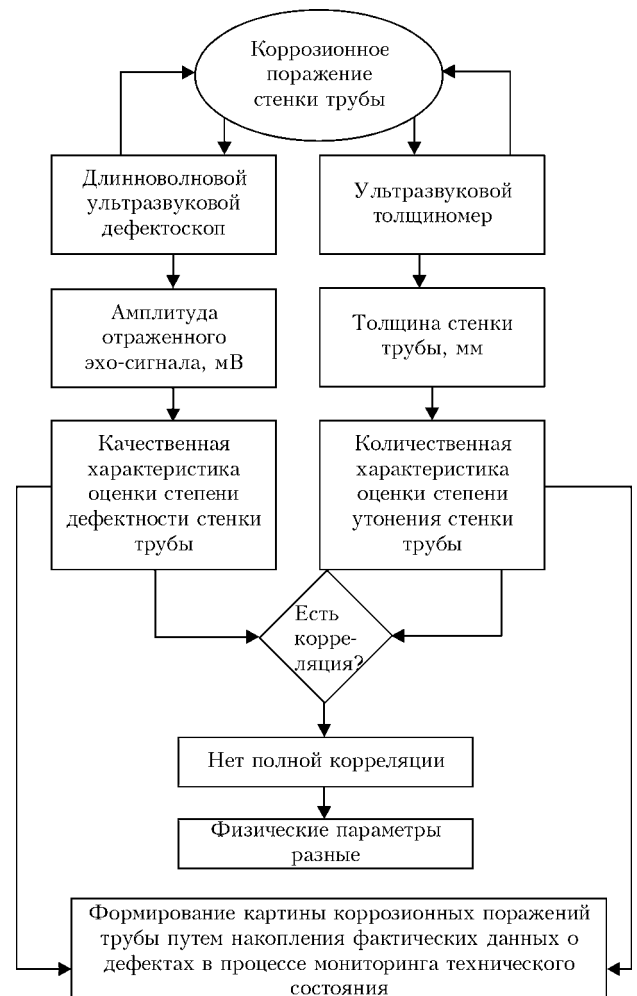


Рис. 7. Схема алгоритма оценки степени дефектности и утонения поперечного сечения трубы



Рис. 8. Комплексные методы диагностики и контроля технического состояния трубопроводов

фектах с использованием средств дальнодействующего УЗК направленными волнами и средств локального НК. Это значит, что для решения задач технологии трубопроводов НЧ направленными волнами необходимо поддерживать обратную связь по фактическим статистическим данным, с помощью которой между данными по направленным волнам и данными по типу коррозии (степени коррозионного утонения) может быть установлена корреляционная зависимость.

Высказанные соображения подтверждаются исследованиями, приведенными в работе [12]. Исходя из этого, может быть предложена общая схема комплекса методов диагностики и НК технического состояния трубопроводов различного назначения при использовании для обнаружения дефектов дальнодействующего УЗК НЧ направленными волнами, которая приведена на рис. 8.

После полного контроля всей длины трубопровода участки, на которых была обнаружена коррозия, оценивают путем измерения толщины ультразвуковым толщиномером или другими методами контроля (радиографическим, вихретоковым), после чего при необходимости определяют точки для постоянного наблюдения и мониторинга технического состояния трубопровода.

Следует также отметить, что применение технологии и техники дальнодействующего УЗК направленными волнами требует полного понимания факторов, которые влияют на результаты контроля, практического опыта интерпретации результатов.

Выводы

1. Показано, что при контроле протяженных трубопроводов только незначительная часть падающей направленной волны отражается от различных видов несплошностей.

2. Чувствительность современных систем НЧ УЗК для надежной диагностики протяженных трубопроводов составляет 9 % потери металла в поперечном сечении трубы.

3. Амплитуда отраженного эхо-сигнала не несет информации о глубине поражения стенки трубы, так как оценка дефектности трубы направленными волнами является качественной, а измененная по месту глубина является количественной, поэтому между этими величинами нет полной корреляционной связи.

1. Mudge P. J., Lank A. M., Allyn D. N. A long range method of the detection of corrosion under insulation in process pipework. — Thepmie Project: OG474/94, 5 th European Union Hydrocarbons Symposium, Edinburg, 26–28 Nov., 1996.
2. Rose I. L. Ultrasonic waves in solid media // Cambridge University Press. — New York, 1999. — P. 77–82.
3. Hagan T., Hedo M., Takemura K. Практика применения направленных волн в ультразвуковой дефектоскопии / Хихакай Кэйсону. — 2003. — 52, № 12. — С. 667–671.
4. Патон Б. Е., Троицкий В. А., Бондаренко А. И. Метод низкочастотного ультразвукового контроля протяженных трубопроводов направленными волнами // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2008. — № 2. — С. 20–30.
5. Patel R., Rudlin J. Analysis of corrosion/erosion incidents in offshore process plant, and implications for non-destructive testing // Insight. — 2000. — 42, № 1.
6. Бондаренко А. И. Исследование механизмов взаимодействия низкочастотных направленных волн с несплошностями трубопроводных систем / Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2009. — № 1. — С. 18–25.
7. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. — М.: Изд-во иностр. лит., 1957. — 727 с.
8. Скучик Е. Основы акустики / Пер. с англ. — М.: Мир, 1976, т. 1. — 520 с.
9. Alleyne DN., Crawley P., Mudre P. J. The development of a quick method for the detection of corrosion and pitting in pipework. Final report for the LINK Industrial Measurement Systems Programme. — TWI report 88157/33/95, January 1995.
10. Mudre P. J., Lank A. M. Detection of corrosion in pipes and pipelines. ASNT International Chemical and Petroleum Industry Inspection Technology Topical Conference V, Houston, Texas, 16–19 June 1997.
11. Report. Long Lunge Ultrasonic testing technique — performance details / Document reference: TTP/01. May 2001. — 20 с.
12. Техника контроля направленными волнами для эксплуатационного контроля заводских трубопроводов / Т. Икэда, Р. Канэхара, М. Миядзава и др. // Hinakai Kensa. — 2005. — 54, № 11. — P. 595–599.
13. Reliability Assessment for Containment of Hazardous Materials RACH. European Commission. — Project OG 112/FR/UK. Final Report, 1999.
14. Topical Report GRI-94/0381: GRI Pipeline Simulation Facility Metal Loss Defect Set / M. J. Koenig, T. A. Bubenik, S. W. Rust, J. B. Nestleroth // Gas rezearch Institute, April 1995.
15. Long Lunge Ultrasonic test system. Section 1. System Overview and Principles of Operation. — Sept., 2004. — 6 с.



ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЗАВОДСКИХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ СТАЛИ 09Г2С-12 СТЕНКИ РУЛОНИРОВАННЫХ РЕЗЕРВУАРОВ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ НЕФТИ ПОСЛЕ 20–25 ЛЕТ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Ю. П. БАРВИНКО

Увеличение сроков службы стальных цилиндрических рулонированных резервуаров большой вместимости требует не только восстановления работоспособности отдельных конструктивных элементов в связи с их механическими или коррозионными повреждениями, но и оценки остаточного ресурса работоспособности сварных соединений стенки. Выполнены экспериментальные исследования остаточного ресурса указанных соединений из стали 09Г2С-12. Соединения вырезаны из стенки резервуара после его эксплуатации в течение 25 лет в режиме малоциклового нагружения. Приведены результаты исследований.

Extension of service life of cylindrical coiled steel tanks of large capacity requires not only restoration of the performance of individual structural elements in connection with their mechanical or corrosion damage, but also assessment of the residual life of welded joints of the wall. Experimental studies of residual life of the above joints of 09G2S-12 steel were performed. Samples were cut out of the tank wall after its operation for 25 years in the low-cycle loading mode. Investigation results are given.

Вследствие относительно высоких прочностных свойств, низкого содержания углерода, достаточной для многих климатических районов хладостойкости, хорошей свариваемости и умеренной стоимости горячекатаная сталь 09Г2С-12 находит широкое применение в большинстве ответственных строительных конструкций. Сталь 09Г2С-12 применяется для нижних поясов стенки рулонированных резервуаров вместимостью 10, 20 и 50 тыс м³. Большинство нефтепарков в Украине с резервуарами указанной вместимости были построены в 1960–1970 гг. в связи с появлением в европейской части страны нефти тюменских месторождений. К настоящему времени резервуары в основном отработали (в режиме малоциклового нагружения) нормативный срок службы, равный 20 годам, и по результатам обследований был выполнен или требуется выполнение капитального ремонта. Учитывая высокую стоимость листового проката, рабочей силы и нанесение на основные конструкции антикоррозионной защиты со сроком службы не менее 10...15 лет, заказчики качественно повысили требования к капитальному ремонту. Резервуары после ремонта должны, по возможности, отвечать новым нормам Украины по конструктивным решениям и иметь гарантированную работоспособность при последующей эксплуатации в течение не менее 20 лет [1].

Выполнение приведенных требований существенно увеличило объем работ, который необходимо выполнить при капитальном ремонте резер-

вуаров. Капитальный ремонт при требуемой гарантии работоспособности резервуаров в большинстве случаев включает полную замену днища с обновлением гидрофобного слоя, нижней части или полностью первого пояса стенки, люков-лазов с Ду = 500 на Ду = 600, замены по всей высоте вертикальных монтажных стыков стенки, настила купольного покрытия или центральной части плавающей крыши. В отдельных случаях при необходимости выполняется подъем резервуара для исправления недопустимого крена, а для емкостей вместимостью 5 тыс м³ и менее устройство железобетонного кольцевого фундамента. Все сварные швы, выполняемые в процессе ремонта, подлежат 100%-му УЗ или радиографическому контролю. Заводские вертикальные швы контролируются в объеме, соответствующем требованиям [2, п.4.96]. На основании анализа заключения по контролю швов может быть принято решение о значительном увеличении объема их контроля.

После выполнения ремонта стенки и днища резервуаров в приведенном объеме практически работоспособность рулонированных резервуаров в последующие 20 лет будет определяться остаточным ресурсом вертикальных заводских соединений стенки. В то же время данные в литературе по исследованию остаточного ресурса заводских вертикальных соединений стенки резервуаров в условиях малоциклового нагружения фактически отсутствуют. Нет и производственного опыта, так как рулонированные резервуары вместимостью 20 тыс. м³ и более в условиях малоциклового наг-



ружения начали эксплуатироваться в 1970-х годах. Поэтому вопрос об остаточном ресурсе указанных соединений широко применяемой стали 09Г2С-12 имеет для эксплуатационников большое практическое значение.

По заданию предприятия «Приднепровские магистральные нефтепроводы» (г. Кременчуг), филиала ОАО «Укртранснефть» в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины выполнены экспериментальные исследования по определению остаточного ресурса заводских вертикальных сварных соединений из стали 09Г2С-12 стенки рулонированных резервуаров после их эксплуатации в течение 20–25 лет в условиях малоциклового нагружения.

Оценку работоспособности (ресурса) выполнили на основании сравнения механических свойств (механических характеристик и значений ударной вязкости) исходных и текущих сварных соединений на их соответствие нормативным требованиям, которые действовали при проектировании емкостей [3, 4] и предъявляются в настоящее время [5, 6].

Исследованию подлежали пластины с заводским вертикальным соединением, вырезанные в процессе капитального ремонта в 2006 г. с первого пояса резервуара вместимостью 20 тыс м³, введенного в эксплуатацию в августе 1982 г., т. е. после 24 лет эксплуатации.

Исходный и текущий материалы — пластины с вертикальным заводским швом. Экспериментальные исследования остаточного ресурса носят сравнительный характер и требуют наличия пластин с исходным заводским сварным соединением и с текущим сварным соединением, т. е. после 20–25 лет эксплуатации резервуара в условиях малоциклового нагружения. Методика экспериментальных исследований остаточного ресурса заводских сварных соединений резервуаров близка к методике таких же исследований остаточного ресурса продольных сварных соединений магистральных трубопроводов, выполненных в ИЭС им. Е. О. Патона [7, 8]. В качестве исходного материала приняты пластины, вырезанные из аварийного запаса труб, отложенных с определенным интервалом вдоль трассы при строительстве трубопроводов, а текущего — пластины (катушки), вырезанные из действующих магистральных тру-

бопроводов при восстановлении аварийных участков. Такой подход подсказал идею получения текущего материала (заготовок) с исходных в лабораторных условиях путем искусственного их нагружения на машинах-пульсаторах до требуемого количества циклов. Заготовки с исходных пластин имели ширину 150 мм, длину рабочей части 310 мм и расположение вертикального шва поперек заготовки. По данным журналов нефтеперекачивающих станций ежесуточного учета налива–слива нефти в период интенсивной работы резервуары имели в сутки два цикла максимального налива–слива нефти. За 20 лет эксплуатации при 300 рабочих дней в году это составило $N = 20 \times 2 \times 300 = 1,2 \times 10^4$ циклов. Циклическое нагружение заготовок для текущих пластин выполняли на пульсаторе ЦДМ-200 с частотой 1 Гц. Напряжение в заготовке составляло от $0,1\sigma_T$ до $0,67\sigma_T$. Предварительно было нагружено четыре заготовки без выравнивания кривизны стенки резервуара. На всех заготовках в металле ЗТВ появились усталостные трещины длиной 15...20 мм после количества циклов N , равном 10^5 ; $3,4 \times 10^4$; 7×10^4 ; 8×10^4 , что превышает требуемое значение $N = 1,2 \times 10^4$. На последующих двух заготовках, выравненных с исключением деформаций шва и околошовной зоны, после $N = 10^5$ циклов визуально трещин не обнаружили. Изготовили еще три выравненные заготовки. После нагружения до $N = 1,2 \times 10^4$ циклов с заготовок, как с текущих пластин, были изготовлены все необходимые образцы.

Программа проведения необходимых экспериментальных исследований. Экспериментальные исследования выполняли путем сравнения результатов испытаний образцов, предусмотренных программой. При этом было принято, что исходные и текущие сварные соединения состоят из основного металла, металла ЗТВ и металла шва. Программа испытаний представлена в табл. 1.

Схема расположения образцов исходного и текущего сварных соединений показана на рис. 1. С учетом траектории распространения гипотетической трещины определение ударной вязкости выполнено на продольных образцах.

Исследование механических свойств исходного и текущего сварных соединений, выпол-

Таблица 1. Перечень исследований и испытаний сварных соединений, выполненных из стали 09Г2С-12

Наименование исследований и испытаний	Исходное сварное соединение			Текущее сварное соединение		
	основной металл	шов	ЗТВ	основной металл	шов	ЗТВ
Входной радиографический контроль сварных соединений	+	+	+	+	+	+
Определение химического состава основного металла	+	–	–	–	–	–
Определение механических характеристик	σ_T ; σ_B ; δ_5 , %; ψ , %			σ_B		
Определение ударной вязкости KCU и KCV (+20 °С; 0 °С; –20 °С; –40 °С)	+	+	+	+	+	+

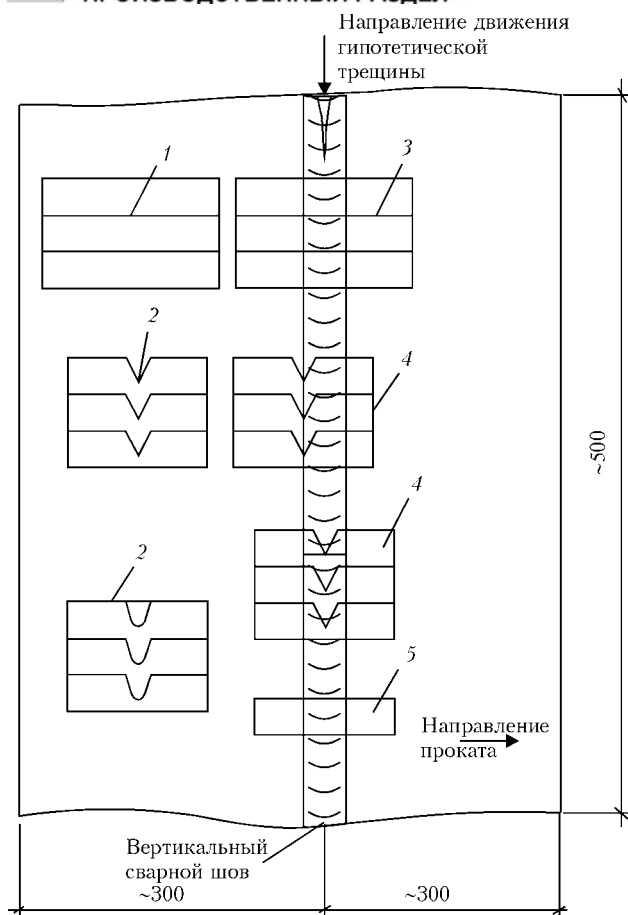


Рис. 1. Схема расположения на пластине-заготовке со сварным швом образцов: 1 — для механических испытаний основного металла; 2 — с надрезами *KCU* и *KCV* для определения ударной вязкости; 3 — для механических испытаний шва; 4 — с надрезами *KCU* и *KCV* для определения ударной вязкости металла шва и ЗТВ; 5 — для металлографических исследований

ненных из стали 09Г2С-12. Как отмечено выше, сталь 09Г2С-12 по ГОСТ 19282-73 [3] представляет собой горячекатаную, кремнемарганцевую сталь с относительно низким содержанием углерода и оптимальным соотношением Mn-Si. Учитывая, что заготовки для исходного и текущего сварных соединений вырезаны с одного резервуара и расположены на одном вертикальном шве первого пояса стенки, их химический состав можно принять одинаковым. Результаты спектрального анализа приведены в табл. 2. Спектральный анализ показал, что химический состав основного металла сварных соединений отвечает требованиям, представленным в [3].

Механические характеристики основного металла исходного и текущего сварных соединений определяли на пятикратных образцах (ГОСТ 1497-73 тип III). Результаты испытаний представлены в табл. 3, из которой видно, что механические свойства основного и текущего металла удовлетворяют требованиям ГОСТ 19282-73 [3], с учетом которого был запроектирован резервуар. Име-

Таблица 2. Химический состав основного металла исходного и текущего сварных соединений, мас. %

Основной металл		C	Si	Mn	S	P
Образцы с пластин	проба 1	0,11	0,60	1,40	0,026	0,030
	проба 2	0,11	0,69	1,38	0,029	0,030
По ГОСТ 19282-73		≤ 0,12	0,5...0,8	1,3...1,7	≤ 0,035	≤ 0,035

ющиеся расхождения σ_B находятся в пределах допусков данного норматива.

Хладостойкость основного металла исходного и текущего сварных соединений, выполненных из стали 09Г2С-12. В соответствии с программой исследований хладостойкость оценивали по значению ударной вязкости на образцах с круглым (*KCU*) и острым (*KCV*) надрезами. Такая оценка хладостойкости включает требования норм, что действовали при проектировании резервуара [3, 4] и новых норм Украины и России [1, 6, 9]. В нормативе [5] к сталям класса С345, к которому принадлежит сталь 09Г2С-12, для толщины 10...20 мм дополнительно требуется значение ударной вязкости $KCV \geq 40$ Дж/см² при $T = -20$ °С. Учитывая, что в нормативах [1, 9] сварное соединение по прочности и хладостойкости должно быть равнопрочным основному металлу, программа испытаний для них принята одинаковой.

Для лучшей наглядности результаты испытаний образцов на ударную вязкость *KCU* и *KCV* для основного металла, металла шва и ЗТВ основного и текущего сварных соединений представлены на рис. 2.

Анализ полученных результатов испытания образцов показывает следующее.

При температуре $T = -40$ °С значение ударной вязкости *KCU* для основного металла исходного (82 Дж/см²) и текущего сварного соединения (108 Дж/см²) полностью удовлетворяет требованиям норм [1] и ГОСТ 19281-73 [4] ($KCU \geq 34$ Дж/см²), а также ГОСТ 19281-89 [5] ($KCU \geq 29$ Дж/см²).

Значение ударной вязкости *KCV* для исходного сварного соединения при $T = -20$ °С соответствует

Таблица 3. Механические характеристики основного металла исходного и текущего сварных соединений

Сварные соединения		σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %	ψ , %
Исходное	Образец 1	319,2	498,2	32,6	70,8
	2	324,7	481,9	33,4	68,6
	3	325,1	491,9	34,0	70,2
	4	320,0	488,7	33,6	69,0
Текущее	Образец 1	334,1	533,5	29,6	69,8
	2	334,6	531,9	30,4	70,8
	3	336,7	537,0	26,6	71,8
По ГОСТ 19282-73		≥ 325	≥ 470	≤ 21	—

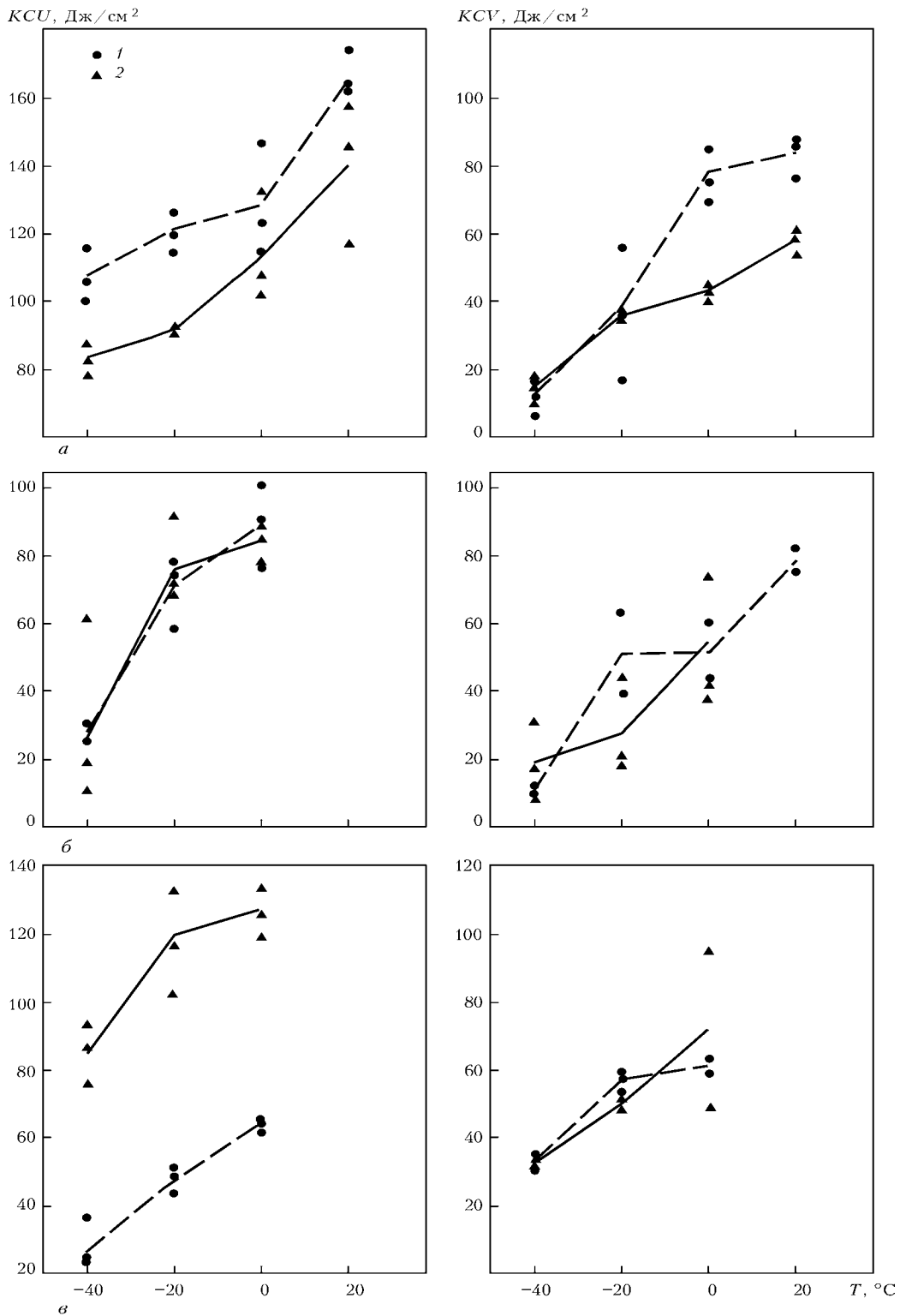


Рис. 2. Результаты испытаний образцов KCU и KCV сварного соединения стали 09Г2С: а — основной металл; б — металл шва; в — 3ТВ (1, 2 — соответственно текущее и исходное сварные соединения)

36, при -40°C — 18 $\text{Дж}/\text{см}^2$. Для текущего сварного соединения при $T = -20^\circ\text{C}$ KCV — 39, при -40°C — 12 $\text{Дж}/\text{см}^2$.

Основной металл исходного и текущего сварных соединений по значению ударной вязкости KCV соответствует требованиям норм [1] с учетом действующего ГОСТ 19281–89 [5] (ошибка определения ударной вязкости в лаборатории $\pm 5\%$).

Требованиям норм России [9] ($KCV = 35 \text{ Дж}/\text{см}^2$ при $T = -40^\circ\text{C}$) оба соединения удовлетворяют только при $T = -20^\circ\text{C}$.

Значение ударной вязкости KCU металла сварного шва для исходного сварного соединения при $T = -20^\circ\text{C}$ — 77, при $T = -40^\circ\text{C}$ — 25 $\text{Дж}/\text{см}^2$.

Для текущего сварного соединения при $T = -20^\circ\text{C}$ KCU — 70, при $T = -40^\circ\text{C}$ — 29 $\text{Дж}/\text{см}^2$.



Металл сварного шва по значению ударной вязкости KCU отвечает только требованиям норм Украины [1], где $T_{расч.} = -20\text{ }^\circ\text{C}$. Нормам России [3], где $T_{расч.} = -40\text{ }^\circ\text{C}$, металл шва не отвечает. Существенного изменения ударной вязкости (KCU) сварного шва исходного и текущего сварных соединений не выявлено.

Значение ударной вязкости KCV для исходного сварного соединения при $T = -20\text{ }^\circ\text{C}$ — 38, при $-40\text{ }^\circ\text{C}$ — 20 Дж/см².

Для текущего сварного соединения при $T = -20\text{ }^\circ\text{C}$ KCV — 52, при $-40\text{ }^\circ\text{C}$ — 10 Дж/см².

Металл сварного шва по значению ударной вязкости KCV отвечает только нормам Украины [1], где при $T_{расч.} = -20\text{ }^\circ\text{C}$ требуется $KCV \geq 40$ Дж/см². Нормам России, где при $T_{расч.} = -40\text{ }^\circ\text{C}$ $KCV \geq 35$ Дж/см² металл шва не отвечает.

Значение ударной вязкости KCU металла ЗТВ при $T = -40\text{ }^\circ\text{C}$ для исходного сварного соединения — 85, для текущего — 26 Дж/см².

Значение ударной вязкости KCU для металла ЗТВ существенно отличается для исходного и текущего сварного соединения. При этом значение KCU для исходного соединения удовлетворяет требованиям норм Украины [1] и нормативам [3, 5]. Значение ударной вязкости KCU для металла ЗТВ текущего соединения удовлетворяет всем нормам только при $T = -20\text{ }^\circ\text{C}$ (расчетная температура для Украины) и не удовлетворяет нормам [1, 9] при $T = -40\text{ }^\circ\text{C}$. Полученный разброс значений для исходного и текущего сварных соединений можно объяснить отличием строения металла в сечении по линии сплавления. Местный уход верхнего или нижнего шва с оси стыка на 3...5 мм при отсутствии разделки кромок приводит к тому, что ЗТВ по части сечения будет проходить по зоне перегрева основного металла. Для получения более точного ответа необходимо увеличить количество образцов исходного и текущего сварных соединений.

Значение ударной вязкости KCV для исходного сварного соединения при $T = -20\text{ }^\circ\text{C}$ — 50, при $-40\text{ }^\circ\text{C}$ — 30 Дж/см².

Для текущего сварного соединения при $T = -20\text{ }^\circ\text{C}$ KCV — 58, при $-40\text{ }^\circ\text{C}$ — 32 Дж/см².

Металл ЗТВ исходного и текущего сварных соединений по значению ударной вязкости KCV отвечает

только нормам Украины [1] (по ГОСТ 12281–89 при $T_{расч.} = -20\text{ }^\circ\text{C}$ значения $KCV \geq 40$ Дж/см²).

Сравнительные испытания образцов на ударную вязкость (KCV) показали, что основной металл, металл шва и ЗТВ удовлетворяют требованиям действующего ГОСТа 19281–89 [5] на сталь 09Г2С-12. Требования норм России [9] (при $T = -40\text{ }^\circ\text{C}$ $KCV \geq 39$ Дж/см²) не удовлетворяются для всех составляющих соединений. Дегградации значений ударной вязкости KCV на текущих сварных соединениях в сравнении с исходными не обнаружено.

Вывод

Выполненный объем исследования механических свойств (механические характеристики и значения ударной вязкости) соединений не выявил явной их дегградации после длительной эксплуатации исходного и текущего сварных соединений. Результаты выполненных исследований позволяют утверждать, что заводские вертикальные сварные соединения стали 09Г2С-12, включая основной металл, стенки рулонированных резервуаров, после их длительной эксплуатации в условиях малоциклового нагружения, имеют ресурс работоспособности, удовлетворяющий требованиям норм Украины [1, п.12.4]. Эксплуатация резервуаров должна осуществляться в соответствии с действующими правилами технической эксплуатации.

1. ВБН В.2.2-58.2–94. Резервуары вертикальные стальные для хранения нефти и нефтепродуктов.
2. СНиП П-В.3-72. Несущие и ограждающие конструкции.
3. ГОСТ 19282–73. Сталь низколегированная толстолистовая и широкополосная универсальная.
4. СНиП П-В.3–72. Строительные нормы и правила. — Ч. II, раздел В. Гл. 3. Стальные конструкции, нормы проектирования.
5. ГОСТ 19281–89. Прокат из стали повышенной прочности. Общие технические условия.
6. ГОСТ 27772–88. Прокат для строительных стальных конструкций. Общие технические условия.
7. О старении и оценке состояния металла эксплуатируемых магистральных трубопроводов / Б. Е. Патон, С. Е. Семенов, А. А. Рыбаков и др. // Автомат. сварка. — 2000. — № 7. — С. 3–12.
8. Оценка состояния металла сварных труб длительно эксплуатируемых газопроводов / С. Е. Семенов, А. А. Рыбаков, Л. В. Гончаренко и др. // Там же. — 2003. — № 4. — С. 3–7.
9. ПБ 03-605–03. Правила устройства вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов.

ПОДГОТОВКА И СЕРТИФИКАЦИЯ ПЕРСОНАЛА В ОБЛАСТИ ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ И МЕТОДА ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ

Е. В. АБРАМОВА, Г. П. БАТОВ

Повышение надежности и эффективности эксплуатации в течение всего необходимого срока службы объектов различных отраслей промышленности является важнейшей народнохозяйственной проблемой любой страны. При этом данная задача решается только при комплексной диагностике объектов, несущих в себе потенциальную возможность создания аварийной ситуации с финансовыми и даже человеческими потерями. К проблеме технической надежности вплотную примыкают задачи обеспечения энергетической и экологической безопасности.

Наиболее важным звеном в системе диагностики технического состояния и оценке качества объектов является персонал, который ее выполняет. С каждым годом увеличивается число специалистов, работающих в области НК и ужесточаются требования к их квалификации. Открываются новые направления диагностики, появляются на рынке более совершенные средства контроля, применение которых требует квалифицированных специалистов. В этой связи центры по обучению и сертификации персонала, работающего в области НК и ТД, разрабатывают специальные программы обучения и сертификации специалистов.

Научно-учебный центр «Качество» (г. Москва) в 2008 г. получил европейское признание полномочий по аттестации персонала в области теплового контроля (ТК) и методу оценки напряженно-деформированного состояния (НДС), причем по НДС — впервые в Европе. Это признание говорит о высоком уровне квалификации специалистов Центра и серьезной методической и приборной базе.

Одним из основных методов диагностики и технического состояния и оценки параметров энергоэффективности энергопотребляющих объектов различных отраслей промышленности, строительства, транспорта, электроэнергетики в силу того, что они работают при температурных нагрузках, или при их эксплуатации выделяется тепло, является ТК. Здесь информацию о харак-

теристиках объекта несет температура его поверхности, значения которой в основном определяются изменением теплофизических, геометрических показателей и параметров нагрузки.

Тепловой контроль имеет ряд очевидных преимуществ перед другими методами дефектоскопии:

- широкую область применения — как традиционного метода дефектоскопии, который осуществляется путем воздействия на объект (специального нагружения: нагрева, охлаждения) с целью изменения его теплового состояния и последующего анализа его реакции в виде возмущений температурного поля (активный метод), так и без нагружения (пассивный метод), заключающийся в регистрации температурного поля объекта в процессе его функционирования, анализе и последующей диагностике технического состояния;

- возможность автоматизации процесса контроля;

- высокую производительность контроля при практически любой величине разрешения вследствие его дистанционности и применения современных средств компьютерной техники, обеспечивающих регистрацию миллионов элементов в секунду;

- мобильность технических средств;

- возможность контроля объектов без вывода их из эксплуатации;

- в большинстве случаев оптимальные соотношения параметров — стоимость аппаратуры/окупаемость — при внедрении;

- возможность использования как первичного диагностического метода для локализации дефектных зон с последующим применением других методов дефектоскопии для более полной диагностики объекта;

- существенными практическими достижениями в данной области в плане предложения новой аппаратуры и технологий контроля;

- необходимостью устойчивого развития экономики при наличии требований экономии топливноэнергетических ресурсов, что невозможно на современном технологическом уровне без раз-

вития средств и технологий теплового контроля, диагностики и мониторинга.

Курс подготовки и сертификации персонала по ТК разработан с учетом этих особенностей. Он включает теоретические и методические основы метода, разработку технологий контроля по объектам, заявленным кандидатом, практические занятия и сдачу квалификационных экзаменов. Срок проведения подготовки и сертификации составляет 2 недели. При этом в Центре проводится обучение персонала и без опыта работы, консультации по выбору оптимального состава средств контроля и оказывается методическая помощь. В Центре работают и привлекаются к обучению ведущие специалисты России по этому направлению [1, 2] и имеется все необходимое оборудование и экзаменационные образцы для проведения практических работ и экзаменов.

Что касается метода оценки НДС, то это основа основ прогнозирования ресурса объектов.

Знание НДС, основных повреждающих факторов, кинетики повреждений и определяющих уравнений механики деформируемого твердого тела и т. п. позволяет перейти к формулировке структуры предельных состояний элементов технических систем в поврежденных состояниях. Методология комплексного подхода к решению проблем прочности, живучести, безопасности и ресурса технических систем включает следующие основные положения:

- оценку состояния конструкционных материалов несущих элементов с учетом исходной технологической наследственности и возникающих эксплуатационных повреждений;
- определение характера, параметров, дислокации и размеров макро- и микродефектов в несущих элементах;
- расчетный и экспериментальный анализ НДС со несущих элементов;
- исследование механизмов естественного и ускоренного старения;
- анализ предельного состояния несущих элементов конструкции;
- оценку живучести материалов и элементов конструкций на разных стадиях повреждений;
- предварительное и уточненное расчетно-экспериментальное определение прочности, живучести, безопасности и остаточного ресурса [3].

Специалистами НУЦ «Качество» разработана, согласована с ведущими организациями и утверждена Президентом РОНКТД Ключевым В. В. Программа подготовки специалистов по курсу «*Определение напряженно-деформированного состояния технических устройств и сооружений*».

Состав преподавателей, тематика читаемых лекций, объем практических задач на конкретных

*Научно-учебный центр «Качество»,
г. Москва*

технических устройствах скорректированы с учетом опыта сертификации первых групп. Центр приобрел стенд СМ-1 для практических занятий по определению НДС. При помощи стенда можно создавать различные виды НДС в образцах из различных материалов. Стенд оснащен датчиками перемещения, динамометрами и тензометрической аппаратурой. Это позволяет определять перемещения и деформации образца, определять и нормировать нагрузку, прикладываемую к образцу, создавать различные условия для проведения практического экзамена. Во время нагружения параметры напряженного состояния можно измерять аппаратурой, основанной на физических методах: эффекте Баркгаузена, ультразвуковым, струнными датчиками, магнитным, радиационным, тепловым и др.

Проведение практических занятий на данном стенде позволяет показать сертифицируемым специалистам общий принцип измерения параметров НДС, сопоставить результаты расчета с результатами измерений различными физическими методами, а также решать прикладные задачи и проводить исследования по обоснованию применения различных методов.

Курс подготовки и сертификации в нашем центре включает:

- лекции по причинам возникновения и типам напряжений в различных конструкциях;
- занятия по расчетным методам и средствам оценки НДС;
- обзор нормативной базы по определению НДС;
- лекции по физическим методам определения НДС;
- практические занятия на стенде СМ-1 с применением различных физических методов измерения напряжений в нагруженных конструкциях различного типа;
- сдачу теоретических и практических экзаменов, расчетов НДС.

Процесс подготовки и сертификации специалистов корректируется и оптимизируется по результатам обратной связи со слушателями, пополняются базы образцов и заключений по ТК и НДС.

Приглашаем специалистов Украины пройти обучение и сертификацию в Научно-учебном центре «Качество».

1. *Тепловой неразрушающий контроль изделий: Науч.-метод. пособие / О. Н. Будадин, А. И. Потапов, В. И. Колганов и др. — М: Наука, 2002. — 472 с.*
2. *Инженерные основы теплового контроля. Опыт промышленного применения / З. Г. Салихов, О. Н. Будадин, Е. Н. Ишметьев и др. — М.: ИД МИСиС, 2008. — 476 с.*

*Поступила в редакцию
13.04.2009*



ПОЗДРАВЛЯЕМ КОЛЛЕГ!

К 45-ЛЕТИЮ НИИ ИНТРОСКОПИИ

В решении задач обеспечения безопасности объектов в таких отраслях промышленности как авиационная, машиностроительная, железнодорожный транспорт, металлургия во второй половине XX-го столетия важное место заняли методы и средства неразрушающего контроля (НК). В связи с этим в 1964 г. в Москве в структуре Министерства приборостроения, средств автоматизации и систем управления СССР создается **Научно-исследовательский институт интроскопии (НИИИН)**.

Перед институтом была поставлена задача координации работ отрасли приборостроения в области создания неразрушающих методов и средств контроля. Московское научно-производственное объединение «Спектр» с вошедшими в его состав НИИ интроскопии и заводом «Контроль-прибор» должны были обеспечить разработку и поставку средств вихретокового, магнитного, рентгеновского, вибрационного, оптического и других видов неразрушающего контроля.

За прошедшие 45 лет деятельности Научно-исследовательский институт интроскопии стал крупнейшим центром России по разработке и созданию всего спектра методов и средств неразрушающего контроля и технической диагностики (НК и ТД), лидером, объединившим научные организации и промышленные предприятия под флагом Российского общества НК и ТД, возглавляемого президентом, директором ЗАО «НИИ интроскопии МНПО «Спектр» **академик РАН В. В. Клюевым**.

Высокий профессионализм специалистов института, инновационная стратегия исследований и разработок обеспечили решение проблем эффективности производства и безопасности эксплуатации в таких важных отраслях, как машиностроение, металлургия, транспорт, строительство, химическая промышленность и др. В институте всегда уделялось серьезное внимание вопросам создания методов и средств автоматизированного контроля сварных соединений. Нам приятно отметить, что в решении этой проблемы НИИ интроскопии и ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины были надежными партнерами.

Трудом нескольких поколений сотрудников института создана научная школа приборостроения в области НК и ТД. Руководством института уделяется серьезное внимание подготовке научных кадров и специалистов для многих отраслей промышленности. Высокий уровень исследований и качество разрабо-



ток обеспечивают специалисты института, среди которых трудятся академик РАН, доктора и кандидаты наук. Более 1000 изобретений сотрудников НИИИН запатентованы в России, Великобритании, Германии, США, Франции, Японии и других странах.

Руководством института и, прежде всего его директором, акад. РАН В. В. Клюевым, уделяется серьезное внимание контактам с научными институтами РАН, НАН Украины, проведению международных выставок и конференций, что обогащает арсенал исследователей и обеспечивает равноправное и взаимовыгодное сотрудничество.

При отделении энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН в составе Объединенного научного совета РАН по комплексной проблеме «Машиностроение» создан и активно работает Научный совет РАН по автоматизированным системам диагностики и испытаний. Председатель Научного совета — академик РАН В. В. Клюев, ученый секретарь — д-р техн. аук., проф. В. Т. Бобров.

Труд ученых и специалистов института высоко оценен, многие исполнители важных правительственных заданий удостоены Государственных премий, награждены орденами и медалями.

Традиции ученых и специалистов, работавших в НИИИН, с успехом продолжают новые поколения исследователей и конструкторов.

От имени Национальной академии наук Украины, ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины и Украинского общества по неразрушающему контролю и технической диагностике (УОНКТД) поздравляем коллектив ЗАО «Научно-исследовательский Институт интроскопии МНПО «СПЕКТР» с 45-летием со дня образования.

Желаем сотрудникам института благополучия, процветания и новых достижений!



ЧОТИРНАДЦЯТА МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ «ЛЕОТЕСТ-2009» В с. СЛАВСЬКЕ

Традиційно в лютому спеціалісти з неруйнівного контролю збираються в засніжених Карпатах у відомому гірськолижному центрі с. Славське Львівської області. Цього року чергова міжнародна науково-технічна конференція «**ЛЕОТЕСТ-2009** «Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів» проходила з **16 по 20 лютого**.

Організаторами цієї щорічної конференції виступили *Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики (УТ НКТД)*, *Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України (ФМІ)*, м. Львів; *Івано-Франківський національний університет нафти і газу (ІФНУНГ)*, *НВФ «Ультракон-Сервіс»*, м. Київ; *НВФ «Спеціальні Наукові Розробки»*, м. Харків; *Центр «Леотест-Медіум»*, м. Львів (організаційне бюро конференції).

Відкрили конференцію голова Оргкомітету, член Правління і голова Західного відділення УТ НКТД, директор центру «Леотест-Медіум», канд. техн. наук **В. М. Учанін** і член правління УТ НКТД, науковий співробітник ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України **Ю. М. Посипайко**.

Як і щороку, найбільшу кількість доповідей винесли на суд колег науковці **Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України**:

- **В. Г. Рибачук**. Класифікація методів вимірювання коерцитивної сили.

- **В. М. Учанін**. Вихрострумове ультидиференційні перетворювачі.

- **С. В. Семочкин, В. Н. Учанін** (Авіакомпанія «Міжнародні авіалінії України», ФМІ, Центр «Леотест-Медіум»). Опыт вихретокового контролю елементов конструкции самолетов фирмы «БОИНГ» в условиях эксплуатации.

- **В. О. Нічога, П. Б. Дуб**. Лабораторний стенд для дослідження дефектів рейок модернізованим методом АСФМ.

- **О. П. Остап, І. М. Андрейко, Ю. В. Головатюк, В. М. Учанін** Оцінювання деградації алюмінієвих сплавів методом вихрострумової структуроскопії.

- **Б. Я. Вербенець, Р. М. Джала, Т. І. Шевчук** (ФМІ Г. В. Карпенка, Національний університет «Львівська політехніка»). Селекція даних БВС при обстеженнях підземних трубопроводів.

- **В. Р. Джала, Л. І. Капко**. Радіохвильовий НВЧ контроль розшарувань плоскошарових діелектричних структур.

- **Н. В. Отир, О. Р. Берегуляк**. Автоматизація визначення чутливості рентгенографічного контролю зварних з'єднань з врахуванням психофізичного закону сприйняття.

- **А. Я. Тетерко, В. І. Гутник**. Оцінка наближення електромагнітного поля поздовжньої тріщини суперпозицією полів елементарних включень.

Жвавий інтерес та цікаву дискусію викликали доповіді гостей з Польщі:

- **Medard Grabowski** (Applus RTD Polska). A new Applus RTD Company in Poland.

- **Bronislaw Ciesla** (EKOPOŁ-JRL, Chorzow). Application of RBI procedures in Offshore production.

- **Dachowski Ryszard, Stepien Anna** (University of Technology, Kielce). Acoustic isolation of sand lime products.

Цікаві доповіді зробили науковці провідних установ та підприємств України:

- **В. Л. Найдя, В. М. Учанін, А. А. Мозжухін, В. Т. Гулько, А. М. Гоголя** (ДКТБ ІЕЗ ім. Є. О. Патона). Розробка елементів автоматизованої системи вихрострумове контролю перемичок колекторів атомних станцій.

- **А. А. Погорелов, Н. А. Богун, М. Н. Новотный, Е. В. Дзыгин** (УкрНИИТехнологии машиностроения, г. Днепропетровск). Акустический дефектоскоп АД 923-60.

- **Г. В. Варуха, А. Н. Никоненко** (ІОМЗ, «Ультракон-Сервіс»). Модернізація ультразвукової установки для контролю ленти из сплава X18H10T.

- **С. В. Семочкин, А. О. Логвинов, А. Н. Черненко** (Авіакомпанія «МАУ», ЗАО «Асоціація ОКО», г. Київ). Опыт ультразвукового контроля элементов конструкции самолетов фирмы БОИНГ в условиях эксплуатации.

- **В. А. Троицкий, Н. Г. Белый, В. Н. Бухенский** (ІЭС им. Е. О. Патона). Портативная рентгентелевизионная система на основе высокочувствительных ПЗС-матриц и монокристаллических экранов CsJ(TL).

- **А. Л. Шекеро, Ал. Алексиев** (ІЭС им. Е. О. Патона, Институт механики Болгарской Академии наук, г. София). Обзор европейских стандартов с нормами оценки качества по результатам ультразвукового контроля.

- **О. А. Вахула, В. Ю. Хоруженко, І. О. Самойлова, О. Л. Кукла, П. А. Манорик, О. В. Шульженко, Ю. М. Посипайко** (ІФП ім. В. Є. Лашкарьова, ІФХ Л.В. Писаржевського, ІЕЗ ім. Є. О. Патона). Оптикоелектронна сенсорна система для визначення парів аміаку та місць його витоків з промислових об'єктів.

Кілька доповідей представили науковці різних університетів України, що свідчить про виконання досліджень в галузі ТД і НК і в навчальних закладах:

- **Н. Л. Тацакович, О. М. Карнаш, М. О. Карнаш** (Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу). Експериментальне дослідження можливості визначення ударної в'язкості неруйнівним методом.

- **І. М. Бучма, Т. М. Репетило** (Національний університет «Львівська політехніка», Політехніка Опольська, Польща). Визначення параметрів заступної схеми ферромагнітної пластини при вихрострумівій товщинометрії.

- **А. Снарский, М. Женировский, А. Левченко** (Національний технічний університет «Київський полі-



технический институт»), *H. Rosen* (Engineering GmbH, Lingen, Germany). Исследование устройства для измерения коэрцитивной силы.

• *С. Б. Убізський, Л. П. Павлик, І. І. Виворотка* (Національний університет «Львівська політехніка», НВП «Карат», Львів). Порівняльне дослідження режимів магнітооптичної візуалізації просторових неоднорідностей магнітного поля.

• *О. V. Bogdan, O. N. Petrishev, V. V. Pilinsky, Y. Y. Yanovska, Y. Yakimenko* (Research Institute «Applied Electronics», National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»). The Mathematical model of the radial mode Piezoelectric transformer Transducer.

Про свої дослідження в розробці дефектоскопів та автоматизованих установок розповіли представники ряду підприємств, що давно пропонують свою продукцію на ринку України:

• *Г. Г. Луценко, В. Н. Учанин, А. В. Джаганян, А. В. Опанасенко, В. Л. Лепеха* (Український НІИ неразрушаючого контролю, г. Киев; ФМИ им. Г. В. Карпенко, г. Львов). Модернизация вихретокового дефектоскопа ВДЗ-71.

• *Г.Я. Безлюдько, Е. И. Елкина* (НПФ «Специальные Научные Разработки», г. Харьков). Коэрцитометрия как объективная первооснова диагностики металлоконструкций и оборудования.

• *В. Васильченко*. Про діяльність фірми «Шерл».

Тези доповідей конференції та ряду інших наукових праць видані окремою збіркою.

В холі конференц-залу проходила виставка засобів неруйнівного контролю та технічної діагностики. В ній брали участь: НВФ «Ультракон-Сервіс», м. Київ; НВФ «Промприлад», м. Київ; НВФ «Інтрон-СЕТ», м. Донецьк; НПФ «Специальные Научные Разработки», м. Харьков; фірма «Шерл», м. Київ; Центр «Леотест-Медіум», м. Львів.

Конференція пройшла в діловій та доброзичливій атмосфері. Її учасники мали досить часу для плідних дискусій та відпочинку. Проживали учасники конференції в пансіонаті «Бойківщина», розташованому на околиці с. Славське в оточенні багаторічних сосен, ялин та смерек поблизу гірськолижних трас. Частина дня учасники могли присвятити відпочинку на гірських лижах на схилах гір Тростян, Кремень, Погар та Високий Верх (див. сайт www.trostan.com).

Оргкомітет: 79017, м. Львів-17, вул. Генерала Гриця, 11/5. Тел./факс: (0322) 75-08-69; e-mail: uchanin@ipm.lviv.ua або leotest@org.lviv.net.

*Ю. М. Посипайко,
ІЕЗ ім. С. О. Патона НАН України, Київ*



Международная специализированная выставка и конференция NDT RUSSIA — «НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ И ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА В ПРОМЫШЛЕННОСТИ»

В марте 2009 г. на территории СК «Олимпийский» в Москве в восьмой раз прошла выставка и конференция NDT RUSSIA.

Основные тематические разделы выставки:

- Техногенная диагностика
- Экологическая диагностика
- Антитеррористическая диагностика

Мероприятие состоялось при официальной поддержке:

- Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору
- Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии
- Федерального космического агентства
- Европейской Федерации по неразрушающему контролю
- Российского общества по неразрушающему контролю и технической диагностике

NDT RUSSIA — одно из самых значимых событий в отрасли неразрушающего контроля, которое не только знакомит участников и посетителей с отечественными и зарубежными образцами оборудования для неразрушающего контроля и технической диагностики в промышленности, но и позволяет обсудить пути решения актуальных проблем промышленной безопасности в ходе работы Международной конференции.

8-я Международная конференция «Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности» в 2009 г. посвящена 45-летию создания Научно-исследовательского Института Интроскопии.

В ходе конференции было представлено 112 научных докладов, из них 40 секционных и 72 стендовых и затронуты такие важные темы как средства антитеррористической диагностики; экспертиза опасных производственных объектов; применение методов неразрушающего контроля в оценке эксплуатационного состояния токосъемных устройств электрических железных дорог; определение остаточного ресурса при техническом диагностировании оборудования ГЭС после выработки нормативного срока службы, развитие, совершенствование и повышение уровня образования в области НК и многое другое.

Организаторы конференции: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, Российское общество по неразрушающему контролю и технической диагностике, Федеральное агентство по науке и инновациям, Российская академия наук, Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии и Российский Союз промышленников и предпринимателей.

Конференция проводилась под патронатом Европейской Федерации по неразрушающему контролю



(EFNDT) и Всемирного комитета по неразрушающему контролю (ICNDT).

NDT RUSSIA — крупнейшая специализированная выставка в России, которая позволяет компаниям-участникам представить новейшие достижения в области неразрушающего контроля. Поэтому проведение конкурса «ИННОВАЦИЯ NDT» стало уже неотъемлемой частью мероприятия. В 2009 г. организаторы выставки совместно с Российским обществом по неразрушающему контролю и технической диагностике провели конкурс уже в 4-й раз. И в этом году количество заявок подтвердило повышенный интерес разработчиков и поставщиков средств НК и ТД к участию в конкурсе. На рассмотрение экспертной конкурсной комиссии было представлено более 30 новинок в области неразрушающего контроля. Наиболее интересные разработки были отмечены высококомпетентным жюри конкурса, в состав которого вошли ведущие эксперты в области неразрушающего контроля.

Победители конкурса «ИННОВАЦИЯ NDT 2009»: **I место:** НИИН МНПО СПЕКТР, ЗАО (Вихревой дефектоскоп ВД-90НП); **II место:** СПЕЦИАЛЬНЫЕ НАУЧНЫЕ РАЗРАБОТКИ, ООО (Толщиномер ультразвуковой УТ-04 ЭМА (Дельта), низкотемпературный вариант); **III место:** ПАНАТЕСТ, ЗАО (УЗ дефектоскоп RapidScan2).

Специальными дипломами были отмечены: ДИАМЕХ 2000 (Анализатор вибрации ОНИКС) — за оригинальное решение проблемы контроля вибраций в широком классе оборудования для разных отраслей промышленности; ВОТУМ, ООО (Дефектоскоп композитных материалов «ДАМИ-С») — за надежное средство контроля для авиационной промышленности.

Помимо традиционной научной конференции, в рамках деловой программы выставки *впервые прошла встреча ведущих производителей и поставщиков оборудования для НК с постоянными и потенциальными потребителями продукции*. Все желающие могли воспользоваться уникальной возможностью получить ответ на интересующий вопрос по практическому использованию, узнать и сравнить отличительные особенности и технические преимущества оборудования сразу нескольких производителей.

Со стороны потребителей оборудования на встрече присутствовали представители компаний: Волгограднефтемаш, ВНИИАЭС, Сургутнефтегаз, КБ Приборостроения, Роскосмос. Со стороны производителей —

представители компаний Пергам, ВОТУМ, Интротест, Луч, Ассоциация ВАСТ, Диагностика-М.

Потребители оборудования проявили интерес к компьютерным ультразвуковым системам для техники Тофт. Также обсуждались вопросы применения в российских реалиях широко используемых на Западе технологий вращающихся ротатив-зондов, х-проб, матричных зондов и прочих более продвинутых разработок и технологий, которые позволяют получить более подробную информацию о дефектах.

Наиболее оживленную дискуссию вызвал вопрос о вариантах бесконтактных приборов контроля технического состояния промышленных трубопроводов.

Также интерес посетителей и участников вызвали следующие мероприятия деловой программы:

- Презентация компании ООО «Делкам-Урал», (Екатеринбург) — «Оперативный контроль линейно-угловых величин».

- Презентация компании ОКТАВА+, (Москва) — «Датчики вибрации фирмы PCB PIEZOTRONICS INC. (США)».

- Награждение победителей всероссийского конкурса специалистов по неразрушающему контролю. В последний день выставки были подведены итоги конкурса специалистов НК и ТД, проведенного РОНКТД и НУЦ «Качество». Специалисты из 10-ти регионов России были отмечены дипломами и ценными подарками. Победителей тепло поздравили Президент РОНКТД акад. РАН В. В. Клюев, Генеральный директор НУЦ «Качество» Н. П. Бирюкова, представители Ростехнадзора и НТЦ «Промышленная безопасность».

Проект **NDT RUSSIA** проводился на одной площадке с Международной выставкой **LAB** — «Лабораторный Контроль в Промышленности» и Международной выставкой «Измерительные Приборы и Промышленная Автоматизация» — **MERATEK**. В 2009 г. Международная специализированная выставка измерительных приборов и промышленной автоматизации **MERATEK** отметила свой 10-летний юбилей и представила новейшее контрольно-измерительное оборудование, которое традиционно используется при технической диагностике.

В выставках **NDT**, **LAB** и **MERATEK 2009** приняли участие 110 компаний из России, Германии, Франции, Румынии, США и Украины. Свои подходы и методы в решении диагностических задач, последние разработки, новейшее оборудование и приборы продемонстри-



ровали российские и зарубежные лидеры отрасли. Представленные экспонаты варьировались от отдельных средств диагностики и измерения до мощных информационно-измерительных систем, прошедших сертификацию и внесенных в государственный реестр. За три дня выставку посетили более 4 500 специалистов.

Из года в год мероприятия содействуют реализации современных наукоемких технологий в разработке, производстве, внедрении и эксплуатации нового диагностического и лабораторного оборудования и развитию отрасли неразрушающего контроля в целом.

В 2010 г. выставки NDT RUSSIA — «НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ И ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА В ПРОМЫШЛЕННОСТИ» и MERATEK — «ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И ПРОМЫШЛЕННАЯ АВТОМАТИЗАЦИЯ» — пройдут традиционно в марте, традиционно в СК «Олимпийский».

Организаторы:

• **Примэкспо, ООО (Россия)** — официальный партнер компании GTE Group plc, уже более 10 лет работает на рынках Москвы, Санкт-Петербурга и других

городов России. В портфеле компании более 20 ежегодных выставок, и этот список постоянно пополняется. Выставки «ПРИМЭКСПО» неизменно отличаются представительным списком участников, высокой посещаемостью и отличной организацией. Многочисленные награды компании за успешную выставочную деятельность позволяют говорить о высоком качестве и престиже организуемых компанией выставочных мероприятий, из которых семи выставкам были присвоены знак UFI (Всемирной Ассоциации выставочной индустрии) и знак Российского Союза выставок и ярмарок (РСВЯ).

• **GTE Group plc (Великобритания)** — компания GTE Group plc, ведущий организатор международных выставок и конференций, была основана в 1991 г. GTE Group имеет 25 офисов в 19 странах мира. Ежегодно GTE Group проводит более 150 выставочных мероприятий в 14 странах мира.

Ждем вас на выставках NDT и MERATEK 17–19 марта 2010 в СК «Олимпийский»!



ИТОГИ V МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «ДИАГНОСТИКА ОБОРУДОВАНИЯ И КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАГНИТНОЙ ПАМЯТИ МЕТАЛЛА»

Конференция «Диагностика оборудования и конструкций с использованием магнитной памяти металла» прошла с 17 по 19 февраля 2009 г. в Москве. Инициатором ее проведения было предприятие **ООО «Энергодиагностика»**. Поддержку в организации оказали: *Российское общество по неразрушающему контролю и технической диагностике (РОНКТД), Российское научно-техническое сварочное общество (РНТСО), Научно-промышленный союз «Управление рисками, промышленная безопасность, контроль и мониторинг» (НПС «РИСКОМ»), Технический комитет ТК-132 Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии РФ.*

В работе конференции приняли участие более 90 специалистов из разных городов России и других стран: Аргентины, Республики Беларусь, Казахстана, Китая, Латвии, Литвы, Монголии, Польши, Украины, Чехии.

На конференции были заслушаны доклады по следующим темам:

• Итоги развития и внедрения метода магнитной памяти металла (МПМ) в России и других странах (по состоянию на февраль 2009 г. метод МПМ получил распространение в 26 странах мира);

• Опыт использования метода МПМ при контроле и оценке ресурса газонефтепроводов, оборудования энергетики, нефтехимии, железнодорожного транспорта и др. отраслей промышленности;

• Критерии предельного состояния металла при оценке остаточного ресурса. Контроль напряженно-деформированного состояния (НДС) оборудования и конструкций;

• Контроль качества изделий машиностроения по структурной неоднородности и остаточным напряжениям;

• Бесконтактная магнитометрическая диагностика газонефтепроводов, расположенных под слоем грунта;

• Новые стандарты России и международные стандарты в области технической диагностики. Опыт РНТСО в области стандартизации через Международный институт сварки (МИС);

• Опыт НПС «РИСКОМ» в разработке нормативной документации в области промышленной безопасности, управления рисками и мониторинга оборудования.

• Подготовка персонала по методу МПМ, контролю НДС и технической диагностике.

Основное внимание было уделено практическому опыту применения метода МПМ в различных отраслях промышленности и на разных объектах. В частности, были представлены доклады об использовании метода МПМ при диагностике грузоподъемных механизмов, оборудования, сосудов и трубопроводов энергетики, газпрома, нефтехимии, шахт, машиностроительных заводов России, Польши, Китая, Литвы, Латвии, Чехии. Освещены также вопросы подготовки и обучения специалистов, методического и нормативно-технического обеспечения, стандартизации метода и сертификации приборов контроля. Широкий спектр практических результатов работ, выполняемых с помощью метода МПМ, был представлен в виде стендовых сообщений и информационных материалов. В рамках конференции была организована выставка современных приборов контроля.

Особое внимание было уделено опыту стандартизации методов НК и их гармонизации с международ-



ными, в частности, через МИС. На конференции были представлены международные стандарты ISO по методу МПМ и новый национальный стандарт ГОСТ Р 53006–2008 «Техническая диагностика. Оценка ресурса потенциально опасных объектов на основе экспресс-методов. Общие требования».

Всего на конференции заслушано 38 докладов ученых и практиков. Среди докладчиков, в частности: президент РНТСО, д-р техн. наук, проф. РГУ нефти и газа им. Губкина *О. И. Стеклов*; зав. отделом экспертизы металлов ЦНИИПСК им. Мельникова проф. *В. М. Горицкий*; профессор ТУ-МЭИ *В. М. Матюнин*; проф. Орловского государственного университета *В. Г. Малинин*; проф. Нижегородского государственного технического университета *В. А. Скуднов*; директор фирмы «PREDITEST» (Чехия) проф. *В. Свобода*; директор фирмы «RESURS» (Польша) *А. Радшевский*; генеральный директор фирмы «Энергодиагностика» проф. *А. А. Дубов*.

В докладе *А. А. Дубова* рассмотрены современные проблемы неразрушающего контроля и оценки ресурса изделий машиностроения, оборудования и конструкций и их решение на основе метода МПМ, перспективы развития метода и приборов контроля.

Профессор *В. А. Скуднов* сделал доклад о синергетике явлений и процессов в металловедении, в механике разрушений (междисциплинарное научное направление). Он отметил связь диагностических параметров в методе МПМ с энергоемкостью материалов.

В докладе *В. Т. Власова, А. А. Дубова* были представлены физические критерии оценки НДС конструкционных материалов, связь термодинамических констант и температур с деформационными способностями разных сплавов.

Профессор *В. Г. Малинин* представил метод МПМ как метод исследования эволюции зон структурных концентраторов напряжений при нагружении изделий и метод прогноза их структурно-механического состояния.

Общим было мнение и пожелание участников конференции осуществлять дальнейшее практическое внедрение метода МПМ как эффективного метода ранней диагностики металла и сварных соединений сосудов, трубопроводов и прочего оборудования различного промышленного назначения, продолжать теоретические и экспериментальные исследования для совершенствования метода и критериев контроля. В решении участников конференции отмечается необходимость включения метода МПМ как отдельного метода НК в перечень нормативных документов Ростехрегулирования РФ, Ростехнадзора РФ и отраслевых стандартов.

Принято решение организовать международный союз фирм, организаций и отдельных специалистов, содействующих развитию метода МПМ — нового направления в технической диагностике.

А. А. Дубов,
ООО «Энергодиагностика», г. Москва



XVIII ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ И ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА»

30 сентября–2 октября 2008 г. в г. Нижний Новгород (РФ) состоялась 18-я Всероссийская научно-техническая и выставка «Неразрушающий контроль и техническая диагностика». Организатор конференции — Российское общество неразрушающего контроля и технической диагностики проводит такие конференции один раз в три года в различных регионах России. На этот раз принимал конференцию Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева.

В работе конференции приняли участие около 350 ученых и специалистов из 120 организаций и предприятий Российской Федерации, среди которых практически все ведущие ученые России в области НК. Заслушано шесть пленарных и около 300 секционных докладов.

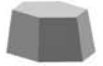
Президент Российского общества неразрушающего контроля и технической диагностики (РОНКТД), академик РАН *В. В. Клюев*, выступая на Пленарном заседании, отметил, что в условиях глобализации мира происходит объединение в единую глобальную систему методов измерения, испытаний, неразрушающего контроля и технической диагностики для решения самой главной проблемы — проблемы промышленной безопасности. Также *В. В. Клюев* отметил, что главным остается разработка новых фундаментальных основ физических и химических методов, способов и ус-

ройств диагностирования, техническое развитие средств приборостроения и экспертных систем.

На пленарном заседании были заслушаны и другие интересные доклады. Так, профессор *О. Н. Будадин* (Москва) подробно доложил об особенностях и области применения теплового метода НК. Этот метод характеризуется относительной «простотой», мобильностью проведения контроля, наглядностью, информативностью результатов и возможностью применения практически во всех отраслях промышленности.

Методологический доклад «Дефекты–дефектоскопия–дефектометрия–ресурс» был сделан на Пленарном заседании профессором *А. К. Гурвичем* (Университет железнодорожного транспорта, Санкт-Петербург) показано, что введение в систему неразрушающего контроля средств дефектометрии создает базу для допуска к эксплуатации изделия с дефектом при условии поэтапного мониторинга состояния дефектной зоны изделия в процессе его эксплуатации, выбирая интервал неразрушающего контроля по методу последовательного приближения.

Большой интерес вызвал пленарный доклад «Инновационные реакторные технологии для атомной энергетики» профессора *В. В. Петрунина* (ОКБМ, Нижний Новгород). Он отметил, что развитие крупномасштабной атомной энергетики, отвечающей критериям устойчивого развития страны, предполагает своевременную подготовку новых технологий атомной промышлен-



ленности. Эти работы на высоком научно-техническом уровне проводят в ОКБМ совместно с другими предприятиями страны (ВНИИ ПИЭТ, РНЦ «КИ» и др.). Основные положения и результаты функционирования системы НК на опасных производственных объектах доложены на пленарном заседании д-ра техн. наук *Н. Н. Коноваловым* (НТЦ «Промбезопасность Ростехнадзора», Москва).

Роль НК в обеспечении безопасности промышленных предприятий раскрыта в докладе канд. техн. наук *В. А. Тамарова* (МТУ Ростехнадзора, Нижний Новгород).

На конференции работали 12 научных секций по различным методам НК и направлениям их использования:

- Магнитные, электрические и электромагнитные методы (31 доклад);
- Акустические и ультразвуковые методы (35 докладов);
- Тепловые методы (9 докладов);
- Методы проникающих веществ (18 докладов);
- Автоматизированные системы контроля качества продукции и неразрушающего контроля (33 доклада);
- Оценка напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса изделий и конструкций (35 докладов);
- Специальные методы и средства диагностики (16 докладов);
- Метрология, стандартизация и сертификация (9 докладов);
- Моделирование в неразрушающем контроле и обработка дефектоскопической информации (18 докладов);
- Контроль структуры фазового состояния и механических свойств изделий (29 докладов);
- Системы технической диагностики и мониторинга в промышленности, строительстве и на транспорте (36 докладов);

- Виброконтроль и вибродиагностика энергомеханического оборудования (10 докладов).

В рамках конференции была организована работа четырех круглых столов, посвященных задачам обеспечения безопасности на промышленных предприятиях:

- Состояние безопасности на предприятиях ядерной энергетики и задачи совершенствования методов и средств НК;
- Состояние безопасности на предприятиях нефтехимического комплекса и задачи совершенствования методов и средств НК;
- Новые средства НК при их эксплуатации;
- Виброконтроль и вибродиагностика.

Одновременно с конференцией работала выставка средств НК. Она была несколько меньше, чем ежегодные московские выставки — в ней участвовало около 20 фирм и организаций. Отрадно отметить, что на выставке были представлены две украинские фирмы: «Промприбор» (г. Киев) и «Специальные Научные Разработки» (г. Харьков), активно осваивающие российский рынок средств НК. Следует отметить и других участников выставки: МНПО «Спектр», «Интерюнис», «Букотест-рос. бюро», «ВОТУМ», «Индустрия-Сервис», «Инакон», «Луч-Диагностика», ППМ «Сис-темз», «Технотест», «Энергодиагностика» (все — г. Москва), «Константа», «Машпроект», «Измеритель» (все — г. Санкт-Петербург) «ГлобалТест» (г. Саров), Дзержинский политехнический институт, «Радиофизика» (г. Волгоград), «Кропус» (г. Ногинск), «Рентген-сервис» (г. Нижний Новгород), «Стройприбор» (г. Челябинск).

Конференция прошла в насыщенной деловой атмосфере и отличалась большим числом научных и деловых контактов. С тезисами докладов конференции можно познакомиться в секретариате УО НКТД или на сайте www.nntu.nnov.ru.

*Ю. Н. Посытайко,
ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины*

ПОДПИСКА — 2009 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
	80 грн.	160 грн.	700 руб.	1400 руб.	26 дол. США	52 дол. США

*В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.

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

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

ПОДПИСНОЙ КУПОН		
Адрес для доставки журнала _____		
Срок подписки с _____	200 г. по	200 г. включительно
Ф. И. О. _____		
Компания _____		
Должность _____		
Тел., факс, E-mail _____		



РЕКЛАМА в журнале «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»

Обложка наружная, полноцветная

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

Обложка внутренняя, полноцветная

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

Внутренняя вставка

Полноцветная (разворот А3) (400×290мм) — 570\$
Полноцветная (200×290мм) — 340\$
Полноцветная (200×142мм) — 170\$
Реклама в разделе информации
Полноцветная (165×245мм) — 300\$
Полноцветная (165×120мм) — 170\$
Полноцветная (82×120мм) — 80\$
• Оплата в гривнях или рублях РФ по официальному курсу
• Для организаций-резидентов Украины цена с НДС и налогом на рекламу
• Статья на правах рекламы — 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 21.04.2009. Формат 60584/8. Офсетная печать.
Усл. печ. л. 9,04. Усл.-отг. 9,6. Уч.-изд. л. 9,2+2 цв. вклйки.
Цена договорная. Печать ООО «Фирма «Эссе».
03142, г. Киев, просп. Акад. Вернадского, 34/1.