

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

**Издатель:** Международная ассоциация  
«Сварка»

### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

**Главный редактор**  
**Б. Е. ПАТОН**

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

#### Адрес редакции

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

#### Научные редакторы

Е. А. Давыдов, Л. Ф. Харченко

#### Редактор

Т. В. Юштина

#### Электронная верстка

Л. Н. Герасименко, Д. И. Серета

#### Свидетельство

о государственной регистрации  
КВ4787 от 09.01.2001

Журнал входит в перечень  
утвержденных Министерством  
образования и науки Украины  
изданий для публикации трудов  
соискателей ученых степеней

При перепечатке материалов  
ссылка на журнал обязательна.

Журнал «Техническая диагностика  
и неразрушающий контроль» переиздается  
в полном объеме на английском языке  
под названием «*Technical Diagnostics  
and Non-Destructive Testing*»  
издательством «Cambridge International  
Science Publishing», Великобритания

## СОДЕРЖАНИЕ

95-летие Национальной академии наук Украины  
и ее президента Бориса Евгеньевича Патона ..... 3

### НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

*Патон Б. Е., Троицкий В. А.* Основные направления  
работ ИЭС им. Е. О. Патона по совершенствованию  
неразрушающего контроля сварных соединений..... 13

*Недосека А. Я., Недосека С. А.* Влияние локального  
скопления дефектов на распространение акустических  
волн в пластинах. Сообщение 1 ..... 30

*Учанин В. Н.* Анализ сигналов анаксиальных вихрето-  
ковых преобразователей при взаимодействии с элек-  
тропроводным немагнитным полупространством ..... 37

*Сучков Г. М., Хащина С. В., Десятниченко А. В.*  
Малогабаритная ЭМА приставка к серийному  
ультразвуковому дефектоскопу ..... 44

### СЕРТИФИКАЦИЯ И СТАНДАРТИЗАЦИЯ

*Белокур И. П., Гордонная Ю. О.* К вопросу сертифи-  
кации персонала по неразрушающему контролю дегра-  
дации материала металлоконструкций ..... 47

### ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ

Научно-технический семинар «Методы и средства  
диагностики и контроля технического состояния  
трубопроводных систем разного диаметра» ..... 56

Міжнародна науково-технічна конференція  
та виставка «Нафтогазова енергетика 2013» ..... 56

Европейский фейерверк мероприятий в области NDT ..... 57

НПП «УЛЬТРАКОН-СЕРВИС» – 20 лет ..... 59

Успешное новаторство – достижение  
не интеллекта, а воли ..... 61

#### ИЗДАНИЕ ПОДДЕРЖИВАЮТ:

Технический комитет по стандартизации «Техническая диагностика  
и неразрушающий контроль» ТК-78  
Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики

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

**Publisher:** *International Association «Welding»*

**EDITORIAL BOARD**

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

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

**Address**

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

**Scientific editors**

E.A. Davydov, L.F. Kharchenko

**Editors**

T. V. Ushtina

**Electron galley**

L. N. Gerasimenko, D. I. Sereda

State Registration Certificate  
KV 4787 of 09.01.2001.  
All rights reserved

This publication and each of the articles  
contained here in are protected by copyright.

Permission to reproduce material contained  
in this journal must be obtained  
in writing from the Publisher

«Tekhnicheskaya diagnostika  
i nerazrushayushchiy kontrol»

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

**CONTENT**

95<sup>th</sup> birthday anniversary of the National Academy of  
Sciences of Ukraine and Paton Boris Evgenievich,  
its president ..... 3

**SCIENTIFIC-TECHNICAL**

*Paton B. E., Troitsky V. A.* Main directions of activity of  
E. O. Paton Electric Welding Institute of NASU on improve-  
ment of nondestructive testing of welded joints ..... 13

*Nedoseka A. Ya., Nedoseka S. A.* Influence of local defect  
accumulation on propagation of acoustic waves in plates.  
Information 1 ..... 30

*Uchanin V. N.* Analysis of anaxial eddy-current transducers  
at interaction with electricity-conductive non-magnetic  
half-space ..... 37

*Suchkov G. M., Khashchina S. V., Desyatnichenko A. V.*  
Small-sized EMA attachment to batch-produced ultrasonic  
flaw detector ..... 44

**STANDARTIZATION AND CERTIFICATION**

*Belokur I. P., Gordonnaya Yu. O.* On personnel certification  
on NDT of metal structure material degradation ..... 47

**NEWS AND INFORMATION**

Scientific-technical seminar «Methods and means  
of diagnostics and monitoring of technical conditions  
of pipeline systems of different diameter» ..... 56

International Scientific-Technical Conferences and  
Exhibition «Oil and Gas Power Generation 2013» ..... 56

European Fireworks of NDT Events ..... 57

NPP «ULTRACON-SERVICE» is 20 .....

Successful innovation is achievement of intellect and not  
resolution ..... 61

**JOURNAL PUBLICATION IS SUPPORTED BY:**

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

Ukrainian Society for Non-Destructive Testing and Technical Diagnostic

---

## 95-ЛЕТИЕ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК УКРАИНЫ И ЕЕ ПРЕЗИДЕНТА БОРИСА ЕВГЕНЬЕВИЧА ПАТОНА

*Борис Евгеньевич Патон — выдающийся украинский ученый в области сварки, металлургии и технологии материалов, материаловедения, видный общественный деятель и талантливый организатор науки, академик Национальной академии наук Украины, Академии наук СССР, Российской академии наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники УССР, лауреат Ленинской и Государственных премий СССР и Украины, дважды Герой Социалистического Труда, Герой Украины, участник Великой Отечественной войны, ликвидатор аварии на Чернобыльской атомной электростанции.*

*Вместе со своим отцом — Евгением Оскаровичем Патоном — он создал всемирно известную патоновскую научную школу.*

*Мировой авторитет Б. Е. Патону принесли разносторонняя и чрезвычайно плодотворная научная и инженерная деятельность, стремление направить фундаментальные научные исследования на решение проблем общества.*

*Б. Е. Патон более 60 лет возглавляет всемирно признанный научно-технологический центр — Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины — и уже более 50 лет является бессменным президентом Академии наук УССР (ныне Национальной академии наук Украины).*

*Борис Евгеньевич Патон родился 27 ноября 1918 г. в Киеве. Он выходец из известного дворянского рода Патонов, семейной традицией которого было служение Отечеству и военная служба. Его прадед, Петр Иванович Патон, был зачислен в армию М. И. Кутузова шестнадцатилетним юношей и участвовал в Отечественной войне 1812 г., награжден орденом, завершил службу генералом от инфантерии и сенатором Российской империи. Дед, Оскар Петрович, — военный инженер, гвардейский полковник, консул Российской империи. Отец, Евгений Оскарович Патон, — выдающийся ученый и инженер, основатель и руководитель Института электросварки, человек высокого гражданского долга, Герой Социалистического Труда, участник Великой Отечественной войны 1941–1945 гг., внес большой вклад в победу над фашизмом, награжден боевыми орденами. Мать Бориса Евгеньевича, Наталья Викторовна Будде, происходила из старинного дворянского рода. Она — воспитанница Фребелевского женского педагогического института. Во времена революции, в тяжелые годы гражданской войны и становления нового государства, в годы Великой Отечественной войны она была ближайшим другом и помощником Евгения Оскаровича.*

*Производственная и научная деятельность Б. Е. Патона началась на Уралвагонзаводе в Нижнем Тагиле в 1942 г. С тех пор в течение одиннадцати лет Борис Евгеньевич работал вместе с отцом — это были годы его становления как ученого, исследователя, а затем и как руководителя большого научного коллектива.*

*Борис Евгеньевич оказался одним из наиболее одаренных учеников и достойным последователем своего отца. Он продолжил и блестяще развил дело, начатое Е. О. Патоном.*

*Наряду с большой и напряженной работой на оборонных заводах коллектив института продолжал вести научные исследования. В 1942 г. В. И. Дятлов обнаружил явление саморегулирования плавления электрода при электродуговой сварке под флюсом. Последующее изучение этого явления Б. Е. Патоном совместно с А. М. Макарой, П. И. Севбо, М. Н. Сидоренко послужило основой для создания простого и надежного сварочного автомата. Применение сварочных автоматов позволило многократно увеличить производительность работ при изготовлении танков.*

*Крупносерийное производство на Уралвагонзаводе и других заводах страны танка Т-34, который был признан специалистами лучшим средним танком Второй мировой войны, в значительной мере предопределил нашу победу над фашизмом. Благодаря надежной сварной броне были спасены жизни многих тысяч танкистов.*

*За достижения в механизации и автоматизации сварочных работ при изготовлении боевой техники Б. Е. Патон в 1943 г. был награжден орденом Трудового Красного Знамени.*

---

*В годы войны Борис Евгеньевич выполнил ряд важных исследований статических свойств автоматов для сварки под флюсом, ставших основой его кандидатской диссертации, которую он защитил в 1945 г. В последующих трудах он показал, что оптимальные характеристики имеют автоматы с постоянной скоростью подачи проволоки, укомплектованные источниками питания с быстродействующим регулятором напряжения.*

*За разработку полуавтоматов для сварки под флюсом Б. Е. Патону, специалистам Института электросварки, а также Ленинградского завода «Электрик» была присуждена в 1950 г. Сталинская премия в области науки и техники. Позже этот принцип управления был положен в основу создания полуавтоматов для сварки в защитных газах.*

*Б. Е. Патон плодотворно работал над завершением исследований, связанных с условиями устойчивого горения дуги и ее регулирования. Он успешно защитил докторскую диссертацию и был избран в 1951 г. членом-корреспондентом Академии наук УССР.*

*В эти годы под руководством Б. Е. Патона выполнены исследования сварочных источников питания. Актуальность этих работ была обусловлена тем, что автоматическая сварка под флюсом была одним из самых высокопроизводительных процессов и промышленность остро нуждалась в новых разработках в этой области. В институте развернулись исследования металлургических процессов сварки под флюсом. За короткое время были созданы основы теории металлургии сварки и наплавки под флюсом, разработана гамма флюсов различного назначения. Созданы новые технологии и мощное производство плавящихся флюсов.*

*На основе этих разработок на Харьцызском трубном заводе налажено первое в стране производство высококачественных труб большого диаметра. Б. Е. Патон — один из его создателей. Эта работа была основополагающей в организации и развитии современного массового производства труб большого диаметра для мощных газотранспортных систем СССР на Харьцызском, Челябинском, Волжском, Выксунском и других заводах.*

*В институте был создан новый процесс дуговой сварки под флюсом швов, расположенных в различных пространственных положениях. Впервые он был применен на монтаже пролетных строений киевского моста через Днепр, названного именем главного идеолога сварного мостостроения, технического руководителя проектирования и строительства этого уникального сооружения Е.О.Патона. Позднее был разработан способ дуговой сварки порошковой проволокой с принудительным формированием шва, который был широко использован при сооружении пролетных строений Московского и Южного мостов через Днепр в Киеве и через Волгу в Саратове, сооружении магистральных трубопроводов, металлургических агрегатов, химических аппаратов, корпусов судов.*

*После кончины Евгения Оскаровича Патона в 1953 г. директором Института электросварки им. Е. О. Патона Академии наук УССР был избран Борис Евгеньевич Патон.*

*Борис Евгеньевич развил плановый характер в организации научных исследований института. Он устанавливает деловые связи с руководителями предприятий, совнархозов, министерств, Госплана СССР, организует и возглавляет подготовку предложений о развитии сварки в СССР. В июне 1958 г. ЦК КПСС и Совет Министров СССР приняли постановление «О дальнейшем внедрении в производство сварочной техники», которое предусматривало развитие фундаментальных исследований сварочных процессов, разработку оборудования, материалов, технологий, создание новых НИИ и заводских лабораторий, строительство специализированных заводов по производству сварочного оборудования, материалов, сварных конструкций. В течение последующих пятилеток был принят еще ряд подобных постановлений, выполнение которых предопределило развитие сварочной науки и техники во второй половине XX в. не только в СССР, но и в ряде зарубежных стран. СССР стал ведущей страной мира в области сварки, а наши американские коллеги назвали Киев столицей сварщиков мира.*

*Борис Евгеньевич отличается исключительным умением работать с коллективом. Он всегда готов поддержать интересную идею, по достоинству оценить выполненную работу. Его энтузиазм, редкостная трудоспособность и внимание к каждому сотруднику создают в коллективе института здоровую творческую атмосферу. Примером тому является развитие электрошлаковой сварки. Сотрудник института Г. З. Волошкевич обнаружил, что источником нагрева свариваемого металла может служить расплавленный шлак, по которому протекает электрический ток. Этот процесс*



был назван электрошлаковым. Борис Евгеньевич сумел предвидеть большое будущее этого процесса. Он сосредоточил силы коллектива на решении наиболее важных проблем электрошлаковой сварки. В кратчайшие сроки был создан новый перспективный способ сварки металла большой толщины, проверенный в производственных условиях и готовый к широкому внедрению.

Применение электрошлаковой сварки внесло коренные изменения в технологию производства таких изделий, как барабаны котлов высокого давления, станины тяжелых прессов и прокатных станов, колеса и валы гидротурбин и т. д. Вместо литых и кованных крупногабаритных деталей появились значительно более экономичные — сварные и сварнокованные.

В 1957 г. Б. Е. Патон и Г. З. Волошкевич были удостоены Ленинской премии за создание процесса электрошлаковой сварки и производства на его основе крупногабаритных ответственных изделий. Это достижение было отмечено в 1958 г. Большим призом на Всемирной выставке в Брюсселе. Ряд фирм развитых стран мира приобрели лицензии на использование этого высокопроизводительного способа сварки.

В ноябре 1958 г. Б. Е. Патон был избран действительным членом Академии наук Украинской ССР.

По мнению Бориса Евгеньевича, в обозримом будущем основой сварочного производства останется дуговая сварка. Дальнейшему совершенствованию и развитию этого процесса он уделяет большое внимание и направляет коллектив института на решение актуальных проблем в этой области.

По инициативе Б. Е. Патона были исследованы процессы образования сварочных аэрозолей и создано новое поколение низкотоксичных сварочных электродов. Построены мощные цеха и заводы по производству электродов. Широкое внедрение этой разработки позволило коренным образом улучшить условия труда, во много раз снизить профессиональные заболевания сварщиков. В 1950-х годах в Институте электросварки начало развиваться новое направление работ — автоматизация и механизация процессов наплавки различных материалов на поверхности рабочих органов машин и оборудования горно-металлургического комплекса с целью повышения их износостойкости. Проведены фундаментальные исследования процессов наплавки под флюсом, в защитных газах, самозащитной порошковой проволокой, плазменной струей. Созданы уникальные наплавочное оборудование, материалы и технологии. Организовано промышленное производство наплавочных порошковых проволок. Это направление оказалось чрезвычайно перспективным, оно до сих пор развивается в институте и широко используется в различных отраслях промышленности и строительства.

В 1958 г. Б. Е. Патон выступил с инициативой создания новых способов механизированной сварки конструкций в полевых условиях, на монтаже, на стапелях, под водой и предложил использовать для этих целей порошковую проволоку. Выполнен большой комплекс исследований металлургических и технологических особенностей этого способа сварки. Создан ряд само- и газозащитных порошковых проволок различного назначения, организовано производство порошковой проволоки. Это направление сейчас является одним из ведущих в мировой сварочной науке и технике.

Исследовательские работы и создание способа полуавтоматической сварки порошковой проволокой под водой открыли новые возможности в освоении континентального шельфа, возведении и ремонте портовых сооружений, трубопроводных переходов через реки и других объектов.

Большой вклад внес Борис Евгеньевич в развитие контактной стыковой сварки. Впервые изучено влияние сопротивления короткого замыкания машин для контактной сварки на стабильность плавления и свариваемость металла. Установлена высокая эффективность обратной связи по сварочному току. Предложены оригинальные конструкции трансформаторов, разработаны теоретические основы их расчетов. Под руководством Б. Е. Патона и при его непосредственном участии впервые в мировой практике были созданы системы многофакторного управления процессом контактной сварки оплавлением. Разработано несколько поколений оригинальных машин, которые эксплуатируются в течение десятков лет во многих странах мира. Среди них — машины для сварки рельсов, уникальные комплексы внутритрубных контактных машин «Север», машины для сварки узлов ракет из алюминиевых сплавов и многие другие.

Применение электронного луча оказалось перспективным при сварке различных толстостенных сосудов из сталей, высокопрочных сплавов на основе алюминия и титана, а также других материалов. Решены сложные задачи обеспечения устойчивости электронного луча в атмосфере металличе-



ских паров, выявлены особенности формирования узких и глубоких швов, найдены способы управления, обеспечивающие воспроизводимость оптимальных режимов сварки. Все это позволило создать современное оборудование и технологии, получившие международное признание. Способ дуговой сварки вольфрамовым электродом по слою активированного флюса-пасты, получившей впоследствии название А-ТИГ, был разработан в Институте электросварки им. Е. О. Патона в середине 1960-х годов. Благодаря испарению флюса-активатора удается сжать столб дуги, в несколько раз увеличить глубину провара, повысить производительность сварки и улучшить форму швов. В последние годы Б. Е. Патонем были инициированы исследования, направленные на создание теоретических основ процессов дуговой сварки, с использованием активирующих флюсов. Были установлены основные закономерности влияния сжатия дуги на характеристики теплового и динамического воздействия на сварочную ванну, объяснен механизм глубокого проплавления металла. Эта оригинальная технология получила развитие в СССР и СНГ. Патоновская технология ПАТИГ нашла признание также в странах дальнего зарубежья.

В конце 1980-х годов в Институте электросварки под руководством Б. Е. Патона начались исследования гибридных (лазерно-дуговых и лазерно-плазменных) процессов сварки и обработки материалов. Предложены конструкции лазерно-дуговых плазмотронов прямого и косвенного действия, создан ряд плазмотронов различного технологического назначения. Разработаны новые процессы гибридной лазерно-плазменной сварки и наплавки, в том числе процесс гибридной лазерно-микроплазменной сварки металлов малых толщин.

В 1960-е годы под руководством Б. Е. Патона начаты исследования технологий получения различных покрытий и композиционных материалов путем электронно-лучевого испарения компонентов и конденсации паров на поверхностях изделий или специальных подложек. Электронно-лучевая технология нанесения покрытий, получившая применение в ряде областей техники, позволяет многократно повышать эксплуатационный ресурс многих изделий, в частности, лопаток газовых турбин.

В 1980-е годы по инициативе Б. Е. Патона в институте проводятся исследования способов термического нанесения покрытий с использованием газокислородного пламени и дуговой плазмы; создаются аппаратура и материалы, обеспечивающие получение защитных слоев с различными свойствами.

В 1969 г. под руководством Бориса Евгеньевича была осуществлена первая космическая сварочная технология — сварка в околоземном пространстве. На пилотируемом корабле «Союз-6» космонавт В. Н. Кубасов провел эксперименты по электронно-лучевой, плазменно-дуговой сварке и сварке плавящимся электродом. Были изучены особенности формирования сварных швов в условиях невесомости, доказано, что при работе в космическом пространстве можно получать плотные и хорошо сформированные швы.

В 1979 г. успешно проверена идея нанесения различных металлических покрытий на поверхности элементов космической станции и приборов. Разработан специальный аппарат «Испаритель», создан универсальный ручной инструмент, предназначенный для сварки, пайки и нанесения покрытий. В 1984 г. космонавты С. Е. Савицкая и В. А. Джанибеков провели его испытания в открытом космосе. Затем последовал цикл систематических многоцелевых экспериментальных исследований по отработке конструктивных элементов и технологии сооружения крупногабаритных орбитальных конструкций и объектов. В 1986 г. в космосе построена конструкция в виде разборной фермы (эксперимент «Маяк»). В 1991 г. впервые была проведена пайка узлов ферменных конструкций, создан агрегат для раскрытия и разворачивания солнечных батарей многократного использования орбитальной станции «Мир».

Результаты многолетних исследований в области космических технологий опубликованы в монографии Б. Е. Патона и В. Ф. Лапчинского «Welding in Space and Related Technologies», изданной в 1997 г. в Великобритании, а также обобщены в сборнике «Космос: технологии, материаловедение, конструкции», изданном в 2000 г. под редакцией Б. Е. Патона.

Бывший Генеральный конструктор ракетно-космических комплексов НПО «Энергия» академик РАН Ю. П. Семенов, многие годы работавший вместе с С. П. Королевым, так оценивал вклад Б. Е. Патона в развитие космической программы СССР: «Б. Е. Патон входит в великую плеяду советских ученых и конструкторов, благодаря которым СССР в годы своего существования был могучей и великой державой... Б. Е. Патон — выдающийся ученый XX столетия. Его характерная особенность — уникальное качество претворять идеи в жизнь...».



В начале 1970-х годов под руководством Б. Е. Патона были созданы первые образцы систем, использующих экспериментально-статистические модели сварочных процессов. Интенсивное развитие этих работ привело к созданию автоматических систем управления сварочными процессами, установками и механизированными линиями с использованием микропроцессорной техники.

Под его руководством выполнен большой комплекс фундаментальных и прикладных исследований в области статической и циклической прочности сварных соединений, их сопротивления хрупким и усталостным разрушениям, работоспособности в условиях низких температур. Создан ряд выдающихся сооружений. К ним прежде всего относится уникальный цельносварной мост имени Е. О. Патона через Днепр. Принципы, подходы и конструктивно-технологические решения, отработанные при его проектировании и сооружении, открыли дорогу широкому использованию сварки в мостостроении. Этот мост получил признание Американского сварочного общества как выдающаяся сварная конструкция XX столетия. Опыт строительства моста им. Е. О. Патона был использован при постройке мостов через Днепр в Киеве (Южного, Московского, Гаванского, Подольско-Воскресенского, автодорожного и железнодорожного), в Днепропетровске и в Запорожье, а также моста через реку Смотрич в Каменец-Подольском.

Ярким примером нового подхода к возведению сварных конструкций высокой заводской готовности стало создание технологии разворачивания рулонированных резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов, благодаря которой в короткие сроки была решена проблема восстановления резервуарного парка страны, разрушенного в годы Второй мировой войны.

Совместно с Научно-исследовательским и проектным институтом Укрпроектстальконструкции разработаны проекты и технологии строительства, которые успешно реализованы при возведении уникальных телевизионных башен в Киеве, Санкт-Петербурге, Ереване, Тбилиси, Витебске, Харькове. К выдающимся сварным конструкциям следует отнести и монумент «Родина-мать» в Киеве.

Б. Е. Патон является инициатором и научным руководителем целевой научно-технической программы «Проблемы ресурса и безопасной эксплуатации конструкций, сооружений и машин», к выполнению которой привлечены многие академические и отраслевые институты, вузы и большое количество промышленных предприятий. Получены весомые научно-технические и практические результаты по созданию методических основ, технологий, методов и способов оценки, а также продления ресурса конструкций. В планах академии предусматривается дальнейшее развитие этих работ.

Большое внимание уделяется развитию методов неразрушающего контроля качества и диагностики. Созданы автоматизированные установки для ультразвукового контроля сварных соединений труб большого диаметра, корпусов буровых долот, узлов энергетических установок, сварных соединений из легких сплавов и неметаллических материалов. Развиваются исследования с применением низкочастотных ультразвуковых волн и использованием бесконтактного введения акустических волн в объекты.

Впервые в Украине созданы системы непрерывного мониторинга сварных конструкций, к которым предъявляются повышенные требования безопасности эксплуатации.

Созданы методики прогнозирования механических свойств, ресурса безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов при наличии в них трещиноподобных дефектов и деградации материалов в процессе эксплуатации.

В институте на протяжении многих лет проводятся исследования по материаловедению. Разрабатываются новые конструкционные материалы, технологии их производства, исследуется связь «состав–структура–свойства» применительно к материалам различного назначения. Институт электросварки стал крупным материаловедческим центром, в котором работают и проводят самые сложные материаловедческие исследования высококвалифицированные специалисты по физике металлов, металловедению, электронной микроскопии, масс-спектрологии, Оже-спектрометрии, анализу газов в металлах и сварных швах, рентген-спектральному элементному анализу и другим специальностям.

В 1954 г. Б. Е. Патон возглавил исследование по использованию электрошлакового процесса для улучшения качества металлов и сплавов. В итоге возникло принципиально новое направление в металлургии — электрошлаковый переплав, который в короткие сроки нашел широкое применение и получил



---

мировое признание. Он используется для улучшения свойств жаропрочных, нержавеющей, инструментальных, шарикоподшипниковых и других сталей и специальных сплавов. Металл электрошлакового переплава применяется в настоящее время при производстве роторов мощных турбин, валков прокатных станков, сосудов высокого давления, запорной арматуры тепловых и атомных станций, литого штампового инструмента и других ответственных изделий.

Еще в 1959 г. были начаты работы по рафинированию металлов и сплавов с помощью электронного луча. Электронно-лучевая плавка оказалась эффективным способом повышения качества специальных сталей и сплавов на основе никеля и железа, эффективным технологическим процессом получения особочистых ниобия, титана и многих сплавов на их основе.

В последние годы успешно развивается электронно-лучевая технология получения слитков титана. Разработаны новые высокопрочные титановые сплавы, легированные алюминием, цирконием, ниобием, железом, конструкции промышленных электронно-лучевых установок с промежуточной емкостью. Многие из них не имеют аналогов в мировой практике.

Развиты способ, оборудование и технологии плазменно-дугового переплава металлов и сплавов. Возможности применения плазменно-дуговой технологии особенно расширились после разработки плазматронов переменного тока, что позволило существенно повысить надежность конструкций плавильных агрегатов и источников питания.

В последние годы в мировой металлургической практике широко используется внепечная обработка металлургических расплавов. В Институте электросварки им. Е. О. Патона созданы новые типы порошковых проволок, которые содержат высокоактивные элементы для микролегирования, модификации и десульфурации сталей и чугуна. Разработаны технология и оборудование для изготовления порошковых проволок большого диаметра. Эти исследования получили дальнейшее развитие в Институте проблем материаловедения им. И. Н. Францевича, Донецком политехническом институте и других институтах и предприятиях. Сегодня метод инъекционной металлургии широко применяется на металлургических заводах Украины и России. С его помощью обработаны десятки миллионов тонн стальных расплавов.

В Институте электросварки успешно развиваются исследования в области пайки металлов и сплавов. Новые материалы и технологии пайки широко используются при изготовлении решетчатых крыльев ракет и деталей авиационных двигателей, космической и буровой техники.

В послевоенные годы в СССР были открыты гигантские месторождения нефти и газа. В основном они находятся в Средней Азии, Западной Сибири, на Северном Урале и в других отдаленных районах. Для транспортировки нефти и газа в западные районы СССР и за границу предусматривалось строительство мощных магистральных газо- и нефтепроводных систем.

Под руководством Б. Е. Патона проведен комплекс работ по разработке технологий для сварки трубопроводов. Были созданы уникальные оригинальные технологии и оборудование для контактной сварки неповоротных стыков труб — комплексы «Север». С помощью контактной сварки сварено больше 70 тыс. км трубопроводов, в том числе около 6 тыс. км газопроводов большого диаметра в условиях Крайнего Севера.

Создана оригинальная технология дуговой автоматической сварки неповоротных стыков труб самозащитной порошковой проволокой с принудительным формированием шва — комплекс «Стык». С помощью этой технологии построено свыше 10 тыс. км магистральных газо- и нефтепроводов: «Дружба», «Средняя Азия—Центр», «Уренгой—Помары—Ужгород», «Хива—Бейнеу», «Шебелинка—Измаил», «Ямал—Западная граница», «Ямал—Поволжье» и др.

Профессор Н. К. Байбаков, крупнейший авторитет в нефтегазовом комплексе страны, отмечал, что «Борис Евгеньевич Патон как президент Академии наук Украины, как директор Института электросварки им. Е. О. Патона оказал огромное влияние на прогресс нефтегазового строительства, на развитие нефтяной и газовой промышленности бывшего Советского Союза...».

Борис Евгеньевич уделяет большое внимание реализации достижений современной науки и техники в практической медицине. В 1990-х годах он предложил использовать методы сварки для соединения живых тканей и организовал творческий коллектив с участием сотрудников ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, Института хирургии и трансплантологии им. А. А. Шалимова НАМН Украины, Центрального госпиталя СБУ и других медицинских учреждений. Это сотрудничество привело к созда-



нию нового способа соединения (сварки) мягких тканей, который позволяет быстро и почти бескровно разрезать и соединять биологические ткани, сохраняя их жизнеспособность. Заживление ран при этом происходит значительно быстрее, чем при использовании традиционных хирургических методов, существенно сокращается продолжительность операций, уменьшаются кровопотери, сокращается период послеоперационной реабилитации больных. Способы электросварки живых тканей применяют более чем в 50 клиниках Украины, а также в клиниках России и Беларуси. Успешно выполнено свыше 100 тысяч хирургических операций различного профиля: в общей, торакальной и детской хирургии, онкологии, урологии, гинекологии, отоларингологии, офтальмологии, лечении травм внутренних органов и других направлениях хирургии. В ИЭС им. Е. О. Патона разработано современное оборудование для сварки живых тканей и налажено его производство. Разработаны и применяются на практике более 130 хирургических методик.

В 2004 г. комплекс работ по сварке живых тканей, выполненный под руководством и при активном творческом участии Бориса Евгеньевича Патона, был удостоен Государственной премии Украины в области науки и техники.

Плодотворно сотрудничество института с Национальным институтом хирургии и трансплантологии им. А. А. Шалимова, Донецким областным противоопухолевым центром, Национальной медицинской академией последипломного образования им. П. Л. Шупика, Национальным медицинским университетом им. А. А. Богомольца, Военно-медицинским управлением СБУ, Киевским городским центром электросварочной хирургии и новых хирургических технологий при Киевской городской клинической больнице №1, Институтом болезней глаза и тканевой терапии им. В. П. Филатова, Национальным институтом сердечно-сосудистой хирургии им. Н. М. Амосова, Институтом нейрохирургии им. акад. А. П. Ромаданова, киевскими городскими клиническими больницами № 1, 12, 17, 18 и многими другими медицинскими учреждениями Украины.

Б. Е. Патон уделяет большое внимание международной деятельности института и его ученых. Институт электросварки является постоянным членом Международного института сварки и Европейской сварочной федерации. Под руководством Бориса Евгеньевича издаются и переводятся на английский язык журналы «Автоматическая сварка», «Современная электрометаллургия», «Техническая диагностика и неразрушающий контроль». Это позволяет донести до мировой научно-технической общественности информацию о результатах исследований и новых разработках института.

В институте выросли десятки и сотни талантливых ученых и инженеров. Среди патоновцев много академиков и членов-корреспондентов НАН Украины. Сотрудники института защитили 138 докторских и 716 кандидатских диссертаций. Много работ, о которых говорилось выше, — труд большого и дружного коллектива, сплочению которого в большой мере способствуют личные качества его руководителя — Бориса Евгеньевича Патона.

Одним из основных принципов, заложенных Е. О. Патоном при создании института и развитых Б. Е. Патоном, является проведение целенаправленных фундаментальных исследований и тесная связь науки с производством. Этот принцип настойчиво воплощается в жизнь на протяжении 80-летней истории института.

Научные отделы института, конструкторский отдел, экспериментальные мастерские, опытное конструкторско-технологическое бюро, инженерные центры, экспериментальные производства, опытные заводы создавались на протяжении всей истории института — это неотъемлемые звенья системы организации исследований и внедрения их результатов в производство. Реализация этой системы позволила создать уникальные конструкции, оборудование, материалы, технологии, внедрение которых оказало большое влияние на развитие многих отраслей промышленности: машиностроение, судостроение, ракетно-космический комплекс, авиастроение, энергетику, горнопромышленный комплекс, металлургию и химическое производство, систем трубопроводного транспорта, строительную индустрию и др.

Самоотверженный труд коллектива института высоко оценен государством. Институт награжден орденами Ленина, Октябрьской Революции, Трудового Красного Знамени, многие сотрудники института награждены орденами и медалями СССР и Украины.

Девять работ, в выполнении которых участвовали сотрудники института, удостоены Ленинских премий в области науки и техники, 24 работы — Государственных премий СССР, 34 работы — Госу-

дарственных премий УССР и Украины.

Многoletний самоотверженный труд коллектива института под руководством Бориса Евгеньевича Патона получил мировое признание.

В 1962 г. Б. Е. Патон был избран действительным членом (академиком) Академии наук СССР. В этом же году ученые Академии наук УССР избрали Б. Е. Патона президентом Академии наук УССР (ныне Национальной академии наук Украины). Глубокое понимание роли науки в обществе, ее целей и задач, высокий международный авторитет ученого, преданность науке, неиссякаемая энергия и высокие моральные качества, общественно-политическая деятельность, опыт руководства большим научным коллективом стали решающими аргументами при избрании Бориса Евгеньевича на пост президента Академии наук Украины. В соответствии с уставом академии выборы ее президента проводятся каждые пять лет и Борис Евгеньевич девять раз переизбирался на эту должность. На этом ответственном посту еще шире раскрылся его талант организатора науки. Под его руководством разработана новая структура академии, новый устав, направленный на наиболее рациональное использование научных сил и средств, концентрацию их на решении важнейших фундаментальных проблем науки, которые имеют решающее значение для экономики страны.

По инициативе Б. Е. Патона и при его активной поддержке в системе Академии наук УССР созданы десятки новых институтов и организаций, расширяющих и углубляющих исследования в наиболее важных научных направлениях. Так, 1965 г. по инициативе Б. Е. Патона в Донецке создан академический научный центр и открыт университет, позднее другие научные центры АН УССР — Западный (Львов), Южный (Одесса), Северо-Восточный (Харьков), Приднепровский (Днепропетровск) и Крымский (Симферополь), которые выполняют функции региональных межотраслевых органов координации научной деятельности. Он постоянно добивается четкого определения научного профиля каждого института, заботится о том, чтобы каждый из них стал ведущим в своем направлении в республике, государстве, в мире.

Академия наук является главным научным центром страны, где широким фронтом проводятся исследования по актуальным проблемам естественных, технических, социогуманитарных наук. Учреждения академии занимают достойные позиции в отдельных разделах математики, теоретической физики, физики твердого тела и низких температур, в радиофизике и радиоастрономии, материаловедении, кибернетике и вычислительной технике, нейрофизиологии, молекулярной биологии, микробиологии и вирусологии, генной инженерии и в ряде других областей знаний.

В академии создается опытно-производственная база, получают развитие новые формы связи науки с производством.

В 1963 г. Б. Е. Патон избирается членом Президиума АН СССР. Работа на этом посту позволила ему ознакомиться с работой институтов АН СССР, изучить опыт работы Президиума академии и ее отделений.

Тесное сотрудничество между АН УССР, АН СССР, ГКНТ, РАН, академиями наук союзных республик способствовало развитию в УССР многих новых научных направлений, созданию новых институтов, инженерных центров, укреплению международного авторитета академии.

Борис Евгеньевич инициировал создание крупных комплексных научно-технических программ по отдельным отраслям промышленности, транспорта, связи и сельского хозяйства. Выполняя эти программы, ученые академии внесли весомый вклад непосредственно в решение актуальных проблем развития экономики страны. Эта форма организации научной деятельности получила всеобщее признание.

Б. Е. Патон организовал Научный совет при Президиуме АН СССР по проблеме «Новые процессы получения и обработки металлических материалов», который объединил ученых академических учреждений со специалистами многих других ведомств и способствовал развитию науки о материалах в АН СССР, РАН и НАН Украины. Многие ученые-материаловеды и металлурги, активно работавшие в этом совете, по рекомендации Бориса Евгеньевича были избраны в Академию наук СССР и Российскую академию наук и внесли большой вклад в развитие науки о материалах.

Борису Евгеньевичу присуще глубокое понимание роли и места науки в решении гуманитарных проблем развития общества. Уделяя огромное внимание разработке и внедрению современных технологий в производство, он одновременно добивается осуществления обоснованных научных оценок их влияния



на окружающую среду и человека. Под его руководством большими коллективами ученых академии были выполнены прогнозные оценки негативных экологических и социально-экономических последствий крупномасштабной осушительной и оросительной мелиорации в УССР, интенсивной химизации сельского хозяйства, переброски части стока рек Дунай и Днепр. Принципиальную позицию Б. Е. Патон занял и в вопросе строительства атомной электростанции в районе Чернобыля. К сожалению, известные всему миру события 1986 года на ЧАЭС полностью подтвердили его предостережения.

Выдающиеся способности Бориса Евгеньевича Патона как лидера, ученого и организатора раскрылись в памятные дни Чернобыльской трагедии. Коллективы многих институтов Академии наук УССР, ее Президиума уже с первых дней включились в работу по ликвидации последствий катастрофы. К выполнению этой работы были привлечены сотни ученых, специалистов Академии наук, министерств, ведомств, предприятий республики. Б. Е. Патон руководил подготовкой предложений для директивных органов УССР и Правительственной комиссии СССР. Позже, в сентябре 1997 г., Б. Е. Патон возглавил вновь созданный при Президенте Украины Консультативный совет независимых экспертов по комплексному разрешению проблем Чернобыльской атомной станции.

В 2004–2005 гг. Издательским домом «Академперіодика» НАН Украины был издан двухтомник «Чернобыль 1986–1987 гг.». Приведенные в этом капитальном труде документы объективно и достаточно полно отражают роль Академии наук УССР и самоотверженный труд коллективов институтов академии под руководством ее президента.

После развала Советского Союза и образования независимой Украины в условиях длительного экономического и финансового кризиса, который затронул академию, президент НАН Украины сумел сохранить академию, ее основные научные школы. Удалось на законодательном уровне закрепить статус академии как высшей научной государственной организации, сохранить принципы ее академического самоуправления, осуществить перестройку ее структуры в соответствии с новыми условиями, направить фундаментальные и прикладные исследования на решение неотложных задач строительства государства.

Определены новые приоритеты в области естественных, технических и социогуманитарных наук. Создан ряд новых институтов и центров социогуманитарного профиля.

По ряду направлений математики, информатики, механики, физики и астрономии, материаловедения, химии, молекулярной и клеточной биологии, физиологии удалось сохранить мировой уровень исследований. Растет вклад ученых академии в развитие фундаментальных и прикладных исследований в Украине. Созданы новые технологии, материалы, вычислительная техника, найдены новые месторождения полезных ископаемых и др.

Созданы и успешно работают институты экономики и прогнозирования, экономико-правовых исследований, проблем рынка и экономико-экологических исследований, региональных исследований, демографии и социальных исследований, украиноведения, востоковедения, политических и этнонациональных исследований, социологии, украинской археографии и источниковедения, украинского языка и ряд других отделений, институтов и центров.

Институты академии принимают активное участие в разработке инновационных программ развития экономики Украины, в исследовании ее истории, культуры, языка.

Совершенствуется организация фундаментальных и прикладных исследований, определены приоритеты в развитии отдельных научных направлений и междисциплинарных исследований. Среди них программа «Наносистемы, наноматериалы и технологии», «Сенсорные системы», «Интеллектуальные информационные технологии», «Водородная энергетика», «Энергосбережение», «Проблемы демографии и развития человечества» и др.

Много усилий Б. Е. Патон прилагает для сохранения и развития международного научного сотрудничества, внешнеэкономических связей с деловыми партнерами зарубежных стран.

Ученые Украины участвуют в выполнении многих международных программ. Проводятся совместные конкурсы научных проектов с Украинским научно-технологическим центром, Российским фондом фундаментальных исследований, Российским гуманитарным научным фондом, Сибирским отделением Российской академии наук.

Б. Е. Патон — один из инициаторов создания и сохранения общего научного пространства в рамках



---

СНГ. В 1993 г. была создана Международная ассоциация академий наук (МАН), объединившая национальные академии 15-ти стран Европы и Азии. Борис Евгеньевич уже 20 лет — бессменный президент этой ассоциации. Под его руководством работает Научный совет МАН по новым материалам.

Академик Б. Е. Патон — почетный президент Международной инженерной академии, член Академии Европы, почетный член Римского клуба, Международной академии технологических наук, почетный член Международной академии наук, образования и искусств, Международной астронавтической академии, иностранный член академий и научно-технических обществ многих стран. Десятки отечественных и зарубежных университетов избрали академика Б. Е. Патона почетным доктором, в их числе — Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Санкт-Петербургский государственный технический университет, НТУУ «Киевский политехнический институт», Московский государственный физико-технический университет и др.

Б. Е. Патон вел и продолжает вести большую общественную работу. Его многократно избирали депутатом Верховного Совета СССР и УССР, заместителем Председателя Совета Союза Верховного Совета СССР, членом Президиума Верховного Совета УССР, членом Центрального Комитета КПСС и Коммунистической партии УССР, он был руководителем и членом различных высоких комитетов и комиссий. Перечень его должностей поражает. Он успешно работает на этих должностях благодаря глубокому чувству личной ответственности перед государством, народом, собственной совестью.

Кроме того, его отличают выдающаяся организованность, деловитость, редкая способность безошибочно схватывать главное, мгновенно принимать правильное решение.

Бывший президент Российской академии наук академик Ю. С. Осипов, характеризуя Бориса Евгеньевича, сказал: «Жизнь Б. Е. Патона — в науке, в сфере организаций научных исследований и практической реализации научных достижений, его общественная и государственная деятельность — воистину великий подвиг во имя расцвета науки, во имя будущего».

За огромные заслуги перед наукой и государством Б. Е. Патон удостоен высоких званий дважды Героя Социалистического Труда, Героя Украины. Он — кавалер четырех орденов Ленина, орденов Октябрьской Революции, Трудового Красного Знамени, Дружбы народов, Свободы, князя Ярослава Мудрого I, IV и V степени, орденов «За заслуги перед отечеством» I и II степени и «Почета» (РФ), ордена «Дружбы» (КНР), Франциска Скорины и Дружбы народов (Республика Беларусь), «Ордена Чести» (Грузия), «Достык» (Республика Казахстан), «Шикрет» (почета) (Республика Азербайджан) и многих других наград стран СНГ. Б. Е. Патон — лауреат Ленинской и Государственных премий СССР и Украины в области науки и техники. Ему присуждена Международная премия «Глобальная энергия». Он награжден золотыми медалями им. М. В. Ломоносова, С. И. Вавилова, С. П. Королева, серебряной медалью им. А. Эйнштейна ЮНЕСКО и многими другими наградами и знаками отличия.

Борис Евгеньевич безгранично предан Науке, Институту, Академии, Отечеству.

Сегодня нельзя представить Институт электросварки и Национальную академию наук Украины без Б. Е. Патона. Его житейская мудрость, огромный опыт, международный авторитет в науке и обществе позволили сохранить научный потенциал Украины.

Борис Евгеньевич Патон — лидер, боец, творческая личность, глубоко порядочный и добрый человек, с фантастической энергией и трудоспособностью, огромным опытом, глубокими знаниями во многих областях, способностью постоянно учиться. У него широкая натура, острый аналитический ум, он демократичен, доброжелателен, открыт для общения, доступен, всегда готов поддержать человека в беде, помочь ему.

Символично, что Борис Евгеньевич родился в день основания Национальной академии наук Украины в 1918 г. В 1998 г. при праздновании восьмидесятилетия академии и ее президента огромный зал дворца «Украина» овацией встретил сообщение о присвоении Б. Е. Патону, первому в государстве, звания Героя Украины.

Таков наш дорогой Борис Евгеньевич!

Пожелаем ему от всей души новых успехов, доброго здоровья и большого счастья.

Академик НАН Украины И. К. ПОХОДНЯ



# ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАБОТ ИЭС им. Е. О. ПАТОНА НАН УКРАИНЫ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

**Б. Е. ПАТОН, В. А. ТРОИЦКИЙ**

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

Показана роль Института электросварки им. Е.О.Патона НАН Украины как одной из ведущих научных организаций, сделавших значительный вклад в развитие и становление системы неразрушающего контроля в промышленности. Рассмотрены основные разработки Института в области ультразвукового, радиационного, магнитного и других методов неразрушающего контроля сварных соединений и металлоизделий, которые были успешно внедрены на предприятиях Украины и России. Приведены результаты исследований по развитию современных технологий неразрушающего контроля: TOFD, SAFT, ЭМА, низкочастотного ультразвукового контроля направленными волнами, цифровой радиографии и др. Описана деятельность по гармонизации европейских и разработке национальных стандартов и отраслевых нормативных документов в области неразрушающего контроля. Затронуты вопросы международного сотрудничества в сфере совместных научных исследований и подготовки персонала по неразрушающему контролю в соответствии с международными стандартами. Табл. 3, рис. 26.

*Ключевые слова:* Институт электросварки им. Е. О. Патона НАНУ, неразрушающий контроль сварных соединений, разработка неразрушающих методов контроля, разработка национальных стандартов

Развитие сварочных технологий невозможно без использования методов неразрушающего контроля (НК), способствующих повышению качества материалов и сварных конструкций ответственного назначения. Это, в свою очередь, привело к развитию фундаментальных основ дефектоскопии, увеличению количества разработок по НК.

Создание новых технологий сварки должно сопровождаться разработкой новых методов контроля качества: радиационных, оптических, акустических, электромагнитных, магнитометрических, термографических и других. Поэтому одновременно с развитием сварки все эти годы в ИЭС разрабатывались технологии и создавалось оборудование для НК. В этом процессе принимали участие ведущие НИИ и специализированные фирмы России (МНПО «Спектр», НИИмостов, ВНИИСТ, НИИхиммаш, ВНИИНК, ВНИИБТ и др.), Молдовы (ВНИИНК), Англии (TWI), Дании (Force).

К важнейшим направлениям исследований в области применения физических методов НК относятся ракетно-космические и авиационные задачи, которые в ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ (ИЭС) решаются совместно с Государственным конструкторским бюро «Южное» им. М. К. Янгеля, с Объединением «Коммунар», ГП «Антонов». Так, в разные годы были созданы и внедрены технологии НК узлов ракетно-космической техники, автоматизированный УЗ контроль крупногабаритных конструкций, средства и методики оценки герметичности сооружений больших объемов.

Совместно со Всесоюзным институтом буровой техники, фирмой «Зонд», Ивано-Франковским национальным техническим университетом нефти и газа были разработаны технологии и оборудование, которые дают возможность контролировать буровые долота, буровые трубы и их резьбовые соединения. Не менее важными являются разработки по контролю качества в металлургии (трубы и прокат), технологии и оборудование для автоматизированного УЗК, НК при строительстве важных объектов, например, морских трубопроводов, идущих от буровых платформ, и т. п.

Большое значение для развития и распространения физических методов контроля качества имеет просветительская деятельность. В ИЭС работает Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики (УО НКТД) – общественная организация, созданная в 1990 г., основной задачей которой является консолидация усилий специалистов в пропаганде возможностей, комплексного решения проблем оценки качества материалов и надежности промышленных сооружений, расширения знаний и международных контактов. Развитию деятельности УО НКТД в значительной мере способствовало Российское общество НКТД. УО НКТД поддерживает деловые связи с аналогичными организациями многих стран мира и является членом Европейской федерации НК (EF NDT), Всемирного комитета НК (IC NDT). При участии УО НКТД в 1995 г. была сформирована программа развития НК в Украине, к выполнению которой были привлечены 26 институтов НАН Украины, многие кафедры вузов и



различные фирмы Украины. На основе этой программы создан ряд отраслевых программ, ее положения вошли в перечень основных направлений развития науки и техники в Украине, в вузах появились специализированные кафедры по НК.

В результате кропотливой работы по пропаганде возможностей физических методов НК, разработке стандартов, организационной работе в Украине создано более 800 предприятий разных форм собственности, выполняющих работы по оценке физическими методами (радиационными, магнитными, акустическими и т. п.) контроль качества материалов и сооружений.

В отличие от Беларуси, Молдовы и России в Украине в советские времена не было специализированных НИИ по проблеме НК качества, поэтому ИЭС как крупный технологический центр взял на себя функции по развитию акустических, радиационных, магнитных, вихретоковых и др. методов оценки качества для решения задач промышленности Украины. В 1955 г. в ИЭС появилась первая специализированная лаборатория физических методов по оценке качества сварных соединений, а впоследствии созданы научный и два конструкторских отдела. Совместными усилиями этих подразделений разработано более сотни проектов, большинство из которых были реализованы в различных отраслях промышленности как в Украине, так и за ее пределами.

Начиная с 1974 г. в ИЭС разработан и внедрен ряд автоматизированных установок ультразвукового контроля (АУЗК) типа У-664, У-175, НК-106, НК-205, НК-180, НК-360, НК-362, предназначенных для контроля качества сварных швов различных металлоконструкций, в том числе труб большого диаметра. Автоматизация повысила производительность НК. Например, скорость контроля с помощью установки НК-106 достигает 20 м/мин. Здесь автоматический УЗК ведется одновременно с помощью шести-восьми преобразователей. Каждый канал имеет блок автоматической отметки дефектных участков. С помощью автоматизированных установок УЗК выполняется проверка сварных швов труб в технологических линиях трубосварочных заводов. Однако объективная оценка качества достигается только при применении нескольких разных физических методов, поэтому внедрялись системы комплексного контроля, состоящие, например, из визуально-измерительного, ультразвукового, рентгеновизионного и электромагнитного и других методов контроля качества.

В период с 1980 по 2000 гг. в ИЭС разработаны технологии контроля узлов ветроэнергетических установок, сварных соединений из легких сплавов и неметаллических материалов для летательных аппаратов, железнодорожных колес (НК-364),

трубопроводов атомных реакторов (НК-321). Созданный в ИЭС комплект тренажеров позволяет осуществлять обучение и аттестацию операторов УЗК. Непрерывно разрабатываются новые технологические возможности физических методов, особенно магнитных, акустико-эмиссионных, ультразвуковых, цифровых, компьютеризированных вихретоковых дефектоскопов и высокочастотных акустических микроскопов и низкочастотных дальнедействующих антенн, позволяющие выполнять оценку качества длинномерных сооружений без сканирования их поверхности, которые нужны практически во всех отраслях промышленности. Ученые отдела неразрушающего контроля ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ постоянно привлекаются для выполнения европейских проектов, таких как:

- выполнение контроля протяженных объектов без сканирования их поверхности с помощью низкочастотных УЗ волн с использованием стенок объектов как волноводов нормальных акустических волн;

- использование бесконтактного возбуждения акустических волн в объекте посредством электромагнитно-акустических преобразователей;

- определение параметров дефектов посредством дифракции акустических волн на острых углах дефектов (TOFD) и синтезированной фокусирующей апертуры (SAFT), обеспечивающей информацию о форме и месте расположения внутренних дефектов.

В ИЭС защищено порядка 15 диссертаций по проблемам использования радиационных, ультразвуковых, магнитных, акустико-эмиссионных и других методов для оценки напряженно-деформированного состояния и наличия дефектов в сварных металлоконструкциях. Эти разработки нашли широкое практическое применение на многих промышленных предприятиях страны. В последние годы введена новая профессия – техническая диагностика, возникшая на стыке проблем НК и надежности.

В ИЭС на протяжении нескольких десятилетий функционируют две исследовательские лаборатории радиационных методов НК. Сотрудники этих лабораторий разработали рентгеновские детекторы с малым содержанием серебра, рентгеновизионные системы, устройства для автоматической расшифровки изображений, портативные дозиметры. В последние годы создано оборудование для цифровой радиоскопии сварных соединений на основе ПЗС-матриц, системы цифровой обработки рентгенограмм, архивирования информации. В ИЭС работает уникальная высокоэнергетическая радиационная лаборатория с биологической защитой до 18 МэВ, в которой проводятся исследования изделий большой толщины (до 80 мм по стали) с использованием мощных рентгеновских



аппаратов и бетатронов, реализуется тангенциальное просвечивание тел вращения и др. (рис. 1, 2). Тангенциальное просвечивание в сочетании с цифровой обработкой информации существенно расширяет возможности радиационных методов.



Рис. 1. Стационарные рентгеновские аппараты РУП 150/300 и «Экстравольт-360»

На рис. 2 представлены фрагменты технологии тангенциального просвечивания тел вращения, позволяющей определять остаточную толщину металла, зазоры между обшивкой и телом трубы и т. п. Пока эта уникальная технология в Украине выполняется только в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. Для этого метода разработана цветовая селекция границ радиационного изображения стенок трубы и последующих наслоений, например, теплоизоляции.

На рис. 2, а показан фрагмент цветовой селекции границ радиационного изображения правой стенки трубы и теплоизоляции для отрезка трубы диаметром 60 мм, толщина стенок трубы 5 мм, толщина изоляции 2 мм,  $H_c$  – толщина стенки трубы,  $H_n$  – толщина теплоизоляции, на рис. 2, б поясняется принцип тангенциального просвечивания, на рис. 2, в, г – получаемая информация. Точность определения толщины стенки трубы при обычной обработке изображений составляет  $5 \pm 1,5$  мм. Разработанный алгоритм цифровой обработки изо-

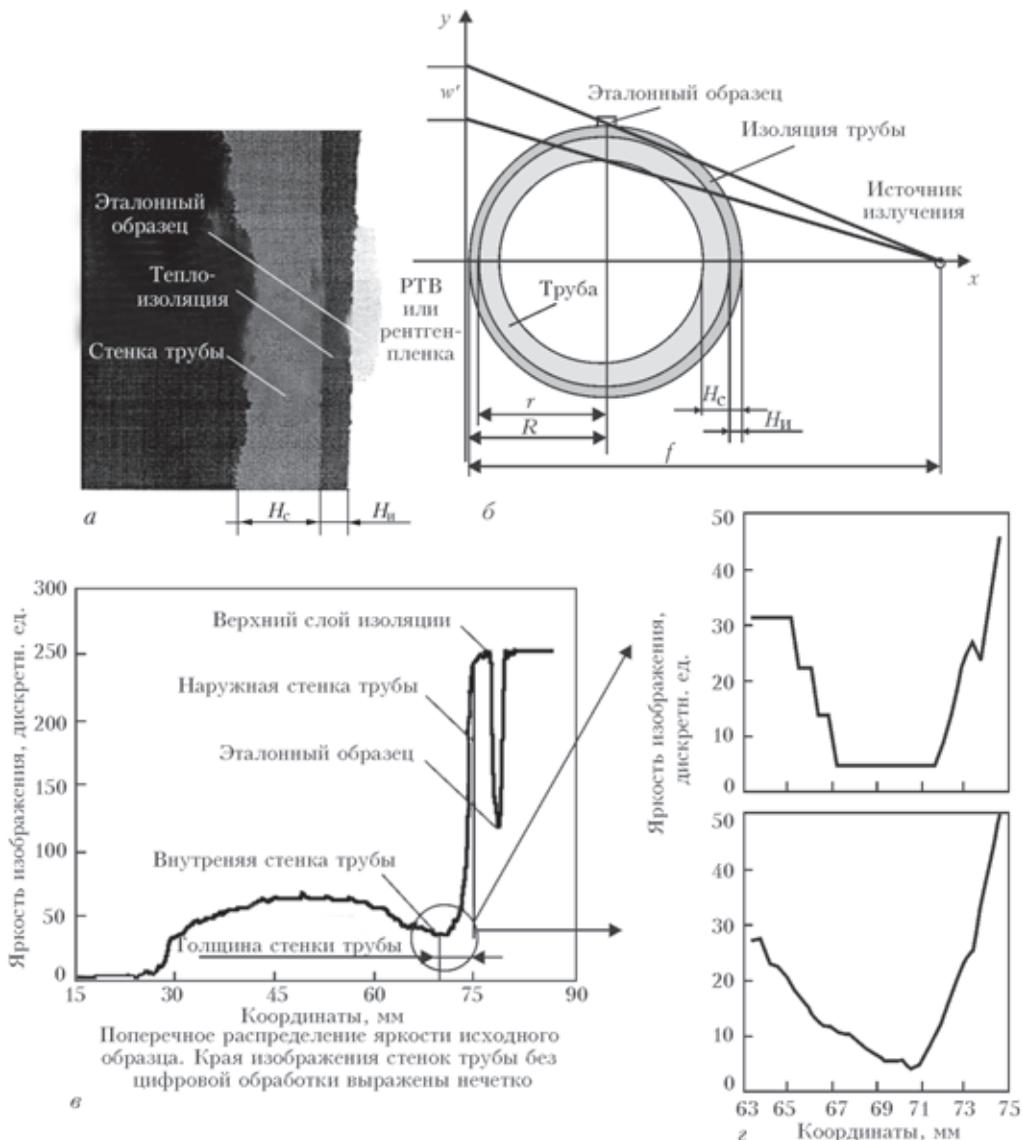


Рис. 2. Фрагменты технологии тангенциального просвечивания тел вращения

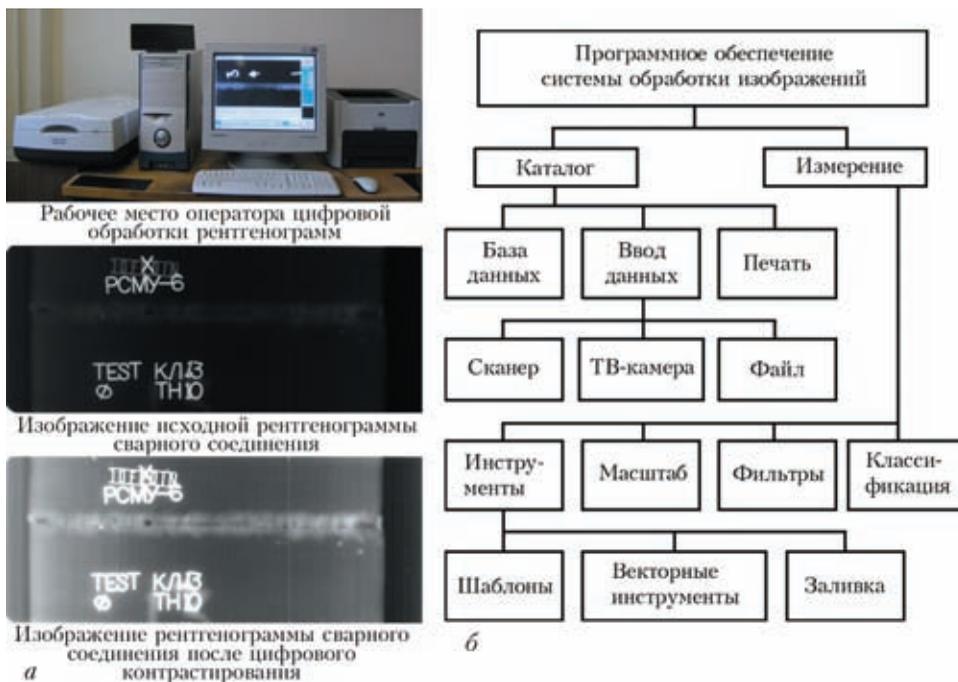


Рис. 3. Система цифровой обработки изображений (а) и структурная схема программного обеспечения системы цифровой обработки рентгенограмм (б)

бражений обеспечивает повышение точности измерений толщины стенки трубы  $5 \pm 0,2$  мм.

Важнейшей процедурой радиационного контроля является расшифровка и архивирование его результатов (рис. 3).

Возможности разработанного комплекса цифровой системы обработки информации:

- сканирование изображений с высокой разрешающей способностью, которое позволяет обнаруживать трудно выявляемые дефекты;
- независимое масштабирование изображений;
- непосредственное измерение длины отрезка или ломаной линии, а также периметра и площади дефекта;
- инвертирование, обращение в зеркальное отображение изображений;
- запоминание произвольного количества интерпретаций обработки изображений;
- сохранение исходных и обработанных изображений, а также сопутствующей текстовой информации в компьютерной базе данных;
- архивирование и документирование результатов контроля;
- повышение достоверности и эффективности радиационного контроля.

В радиационной дефектоскопии значительным успехом была разработка фундаментальных понятий детерминированной и статистической оценки этих результатов. Впервые разработаны статистические эталоны, обеспечивающие более объективную оценку качества, чем детерминированные эталоны, которыми пользуются во всем мире. При оценке качества радиационного изображения с помощью статистических эталонов оператор не

знает расположения и размеров искусственных дефектов.

В разные годы в ИЭС были созданы и внедрены: бесконтактный магнитоакустический дефектоскоп для комплексного контроля гильз цилиндров тракторных двигателей, многоцелевой магнитный дефектоскоп для сварных соединений сложной формы, дефектоскоп на основе сварочного источника, подвижные намагничивающие устройства, работающие на постоянных магнитах из редкоземельных металлов и др.

Оригинальные разработки выполнены в области вихретокового контроля, созданы манипуляторы (НК-331) и зонды для контроля теплообменных трубок парогенераторов и других объектов атомных электростанций. Для оценки герметичности разработан ряд установок и комплектов оборудования для трубопроводов, резервуаров, защитных оболочек. Многие годы совершенствуются комплекты накладных вакуумных камер для листовых и угловых конструкций (рис. 4, а). Такие вакуумные камеры производятся серийно и изготавливаются многими производителями. Эта простая технология требует глубоких знаний происходящих при этом процессов. Высокое разрежение не позволяет выявлять крупные дефекты, при низком не обнаруживаются мелкие дефекты. На основе многолетнего опыта эта технология была доведена до совершенства и автоматизированы ее основные процедуры. На рис. 4, б показана схема вакуумной установки для контроля герметичности сварных соединений труб газовых магистралей. Предложен способ регистрации течей с помощью УЗ в вакуумных камерах, заполненных



водой, разработаны сенсоры для контроля герметичности на базе различных физико-химических явлений. Сварные соединения должны быть не только прочными, но и герметичными (рис. 5). Поэтому проблемы оценки герметичности сварных соединений ответственных изделий ядерной, космической, бытовой техники постоянно требуют конкретных технических решений, над которыми много и успешно работают ученые института.

Для контроля труб теплообменников диаметром 18...26 мм и других труднодоступных для визуального контроля объектов созданы телеэндоскопы с ПЗС-камерой высокого разрешения, установленной на конце телескопической штанги. В последние годы видеоскопы широко применяются во всем мире за счет высокой функциональности

и эффективности в различных отраслях промышленности. Созданным в ИЭС эндоскопом можно диагностировать трубки протяженностью до 14 м.

Создан ряд технологий для измерения различных покрытий, наплавов и фактической толщины металлов, пластика и композитов с внутренней эрозией (рис. 6). Для этих целей относительно недавно найдены интересные решения на основе магнитооптического метода визуализации (МОВ). Средства контроля на основе этого метода кроме дефектов дают информацию об остаточных магнитных полях на поверхности ферромагнитных материалов. Метод МОВ нашел применение в криминалистике. Исследования показали, что он может использоваться и в технике для оценки качества прецизионной обработки поверхностей полированных болтов крепления мощных турбин, поверхности клапанов и их седлаищ мощных двигателей и т. п. Это наиболее точный метод, выявляющий как тонкие дефекты, так и локальные нагружения металла. На рис. 7, 8 показана принципиальная схема МОВ и сравнительные результаты с другими методами (визуальным, капиллярным, магнитопорошковым).

МОВ основан на визуализации топографии магнитного поля рассеивания дефектов с помощью феррит-гранатовой пленки, структура магнитных доменов которой чувствительна к незначительным внешним магнитным полям.

Исследованы способы магнитооптического контроля проката и сварных соединений как с помощью промежуточного носителя информации (магнитной ленты), так и с помощью магнитооптического преобразователя. Магнитооптический метод позволил выявлять мелкие дефекты, которые «не видят» другие методы.

Важной особенностью МОВ с лазерно-оптической визуализацией магнитных полей является представление в реальных размерах как поверх-

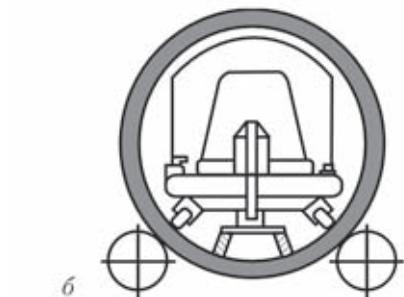
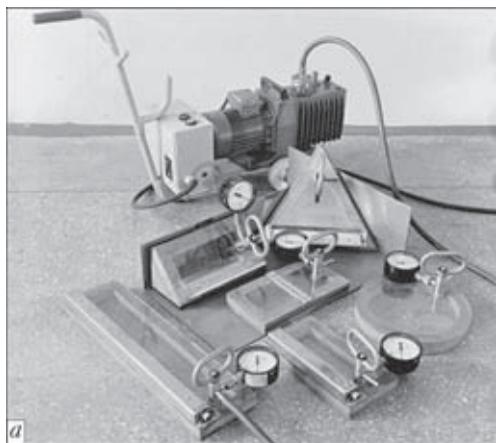


Рис. 4. Комплекты накладных вакуумных камер для листовых и угловых конструкций (а) и схема вакуумной установки для контроля герметичности сварных труб (б)

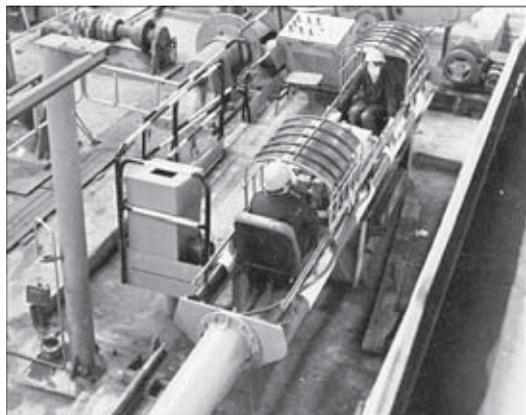


Рис. 5. Установка с двумя операторами, определяющая изнутри герметичность труб по схеме, показанной на рис. 4, б



Рис. 6. Применение вихретоковых, феррозондовых, магнитометрических приборов

ностных и подповерхностных дефектов, так и локальных нагружений структуры металла. Из рис. 8 следует, что этот метод более чувствителен, чем традиционные методы для поверхностных исследований.

Беспорным достижением последних лет является создание портативного цифрового рентгено-телевизионного оборудования (рис. 9) на основе высокочувствительных ПЗС-матриц и флуоресцирующих CsI экранов. Портативность, наличие

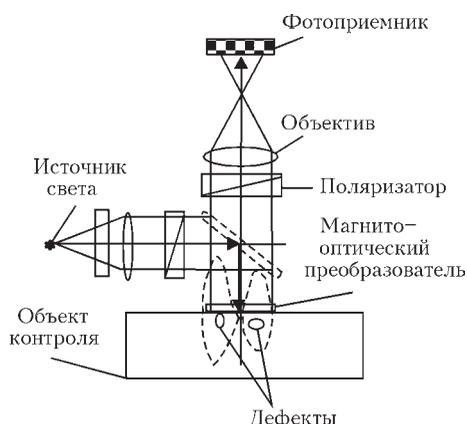


Рис. 7. Принципиальная схема МОВ

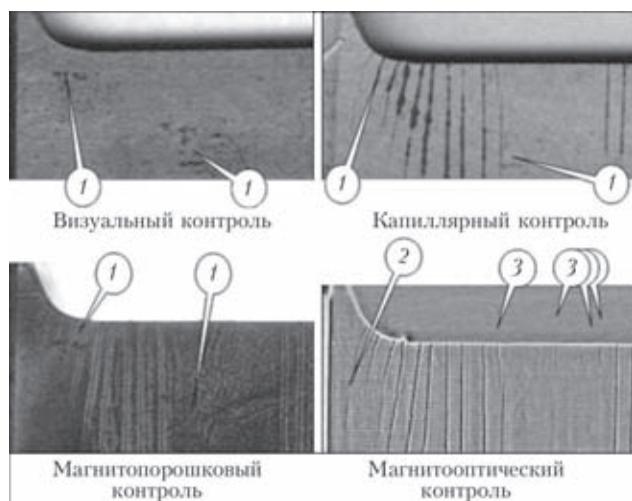


Рис. 8. Сравнение результатов, полученных различными методами контроля: 1 и 2 – световые пигментации (шумы объекта) и мелкие трещины, визуализированные всеми сравниваемыми методами; 3 – особо мелкие трещины, выявляемые только магнитооптическим методом



Рис. 9. Применение портативного цифрового рентгено-телевизионного оборудования: а – размещение аппаратуры на объекте; б – анализ результатов контроля на экране ноутбука

цифровой обработки изображений, низкая стоимость открывают новые возможности для выполнения радиационного контроля в полевых и цеховых условиях многих объектов, которые в настоящее время не обеспечены возможностями НК.

Так, многочисленные газо-, нефте- и гидрораспределительные трубопроводы малого диаметра, технологические трубопроводы нефтехимического производства в настоящее время как в Украине, так и в России практически не проверяются на наличие внутренних дефектов из-за высокой стоимости пленочной радиографии, физических ограничений УЗК для тонкостенных объектов большой кривизны. Внедрение в ближайшие годы средств портативного РТК решит эту проблему. Данная система портативного РТК позволяет выполнять рентген-контроль на порядок дешевле и быстрее, чем при рентгенографии.

В последние десятилетия широкое распространение получили разработанные в ИЭС подвижные намагничивающие устройства на постоянных магнитах (рис. 10). Они существенно потеснили электромагниты, поскольку при этом на порядок уменьшились масса и стоимость оборудования НК, повысилась производительность контроля и возможность сканирования, поиска дефектов. На этой основе в ИЭС разработана серия подвижных переставляемых (рис. 10, а) и вращающихся (рис. 10, б) намагничивающих устройств, которые на порядок повышают производительность МПК протяженных сварных соединений и обеспечивают выявление дефектов разной ориентации, причем вращающиеся магниты имеют гладкую поверхность с подвижным контактным роликом. ИЭС имеет приоритет в этом направлении, производителем подвижных намагничивающих устройств до сих пор остается только ИЭС им.Е.О.Патона.

На рис. 11 показаны эпизоды деятельности сотрудников ИЭС по НК различных объектов. Это мостовые перекрытия (рис. 11, а), в которых обнаружены большие расслоения, элементы тяжелого оборудования (рис. 11, б, в), работающего под высоким давлением, различные трубопроводы

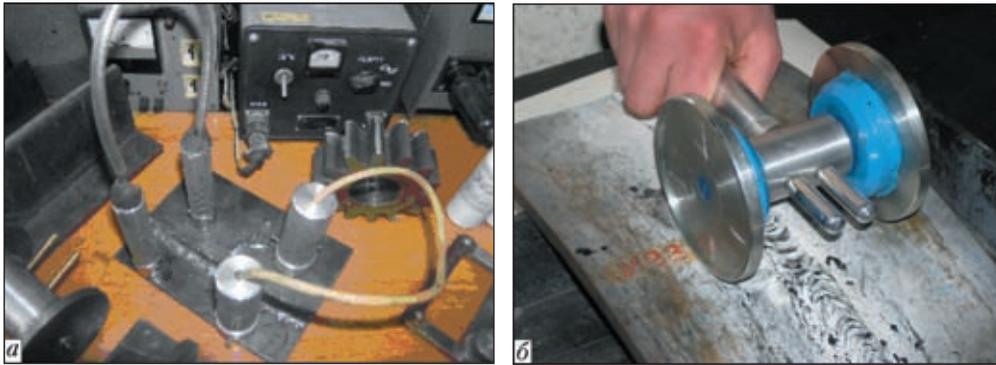


Рис. 10. Подвижные намагничивающие устройства на постоянных магнитах (описание см. в тексте)

(рис. 11, *з-и*), узлы компрессорных станций, различные металлоконструкции. В Украине практически нет ни одного значительного сооружения, где бы в той или иной мере не был использован потенциал ИЭС по НК сварных соединений.

Разработка новых и совершенствование существующих технологий УЗК является одной из основных задач дефектоскопии. За последние десятилетия много сил потрачено на внедрение УЗ-технологий и средств для реализации УЗ волн дифракции (метод TOFD). Это метод точного определения расположения и размеров остроконечных

внутренних дефектов, который состоит в следующем (рис. 12). Два ультразвуковых преобразователя (излучатель и приемник) располагаются навстречу один другому. Излучатель возбуждает продольную волну в широком угловом диапазоне.

УЗ-волны на приемник попадают в следующей последовательности: головная волна; волна, дифрагированная на верхней кромке трещины; волна, дифрагированная на нижней кромке, волна, отраженная от донной поверхности.

Преимущество этого метода заключается в том, что дифрагированная на кромке трещины



Рис. 11. Эпизоды деятельности сотрудников ИЭС по НК различных объектов (описание см. в тексте)

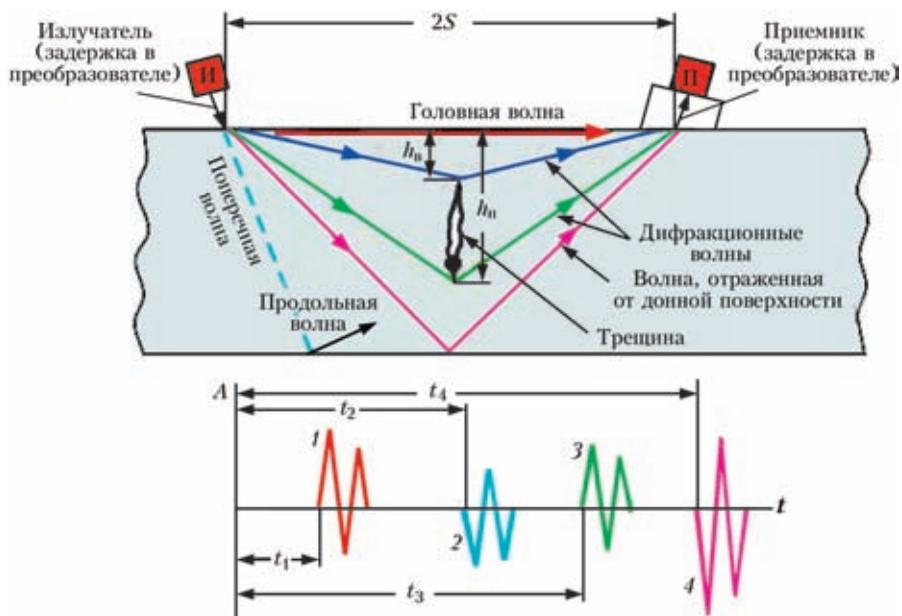


Рис. 12. Схема метода TOFD: 1 – сигнал головной волны; 2,3 – сигнал, вызванный дифракцией соответственно на верхней и нижней кромке трещины; 4 – донный сигнал;  $t$  – задержка времени между излучением и приемом сигналов от соответствующих УЗ волн

волна излучается в широком угловом диапазоне и поэтому положение приемника по отношению к трещине не является таким критичным, как для традиционных методов УЗК. Вторым преимуществом этого метода является не амплитудный, а временной способ оценки размеров и расположения внутренних дефектов.

Недостатком традиционного УЗК, выполняемого с помощью вибрации пьезопластин, является необходимость в промежуточной среде между излучателем УЗ-колебаний и объектом контроля. Обычно это жидкая среда (вода, масло, гель). Часто проблемы в контактной среде (пузырьки, плохое смачивание и т. п.) индицируются при УЗ-контроле как дефект. Это особенно часто встречается при быстродействующем автоматизированном УЗК. Решить эту проблему удалось за счет электромагнитоакустического (ЭМА) возбуждения УЗ колебаний.

В отличие от пьезотехнологии, ЭМА возбуждение УЗ-колебаний производится с помощью силы Лоренца, возникающей внутри металла:

$$F = \frac{J(z,t)B_y}{n}$$

где  $n$  – плотность электронов;  $B_y$  – индукция;  $IW(t)$  – ампервитки катушки  $W$  возбуждения;  $J(z, t)$  – ток, наведенный в контролируемой среде (рис. 13).

В 1980-х гг. над созданием технологий и оборудования для НК многослойных обечаек, для которых было недопустимо применение контактных жидкостей, встал вопрос ввода в металл УЗ-колебаний бесконтактно. Пришлось отказаться от пьезопластин и разработать электромагнитный метод ввода в металл УЗ-колебаний. Эту работу сотрудники ИЭС выполняли совместно с Всесоюзным ин-

ститутом неразрушающего контроля (ВНИИНК). На рис. 13 показан ЭМА-принцип, а на рис. 14 – схема ЭМА-преобразователя, который состоит из магнита 1, концентраторов магнитного поля 2, катушки возбуждения 3, протектора 4, воздушного зазора 5. Сейчас ЭМА-технологии широко применяются при АУЗК.

Кроме сказанного, ЭМА-метод возбуждения позволяет при УЗК сварных швов:

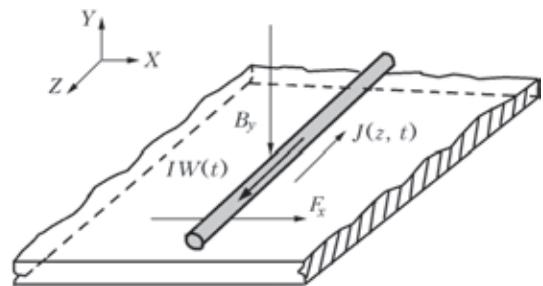


Рис. 13. Схема ЭМА-принципа

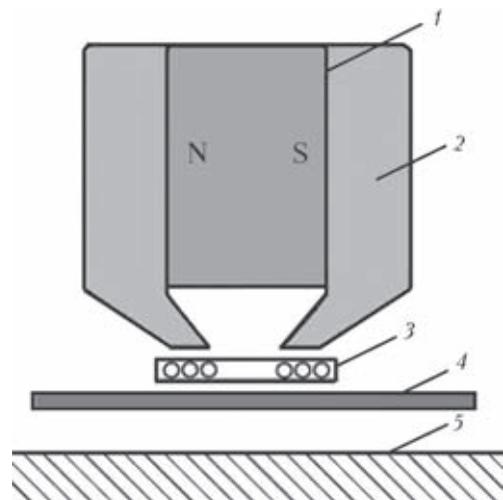


Рис. 14. Схема ЭМА-преобразователя (описание см. в тексте)

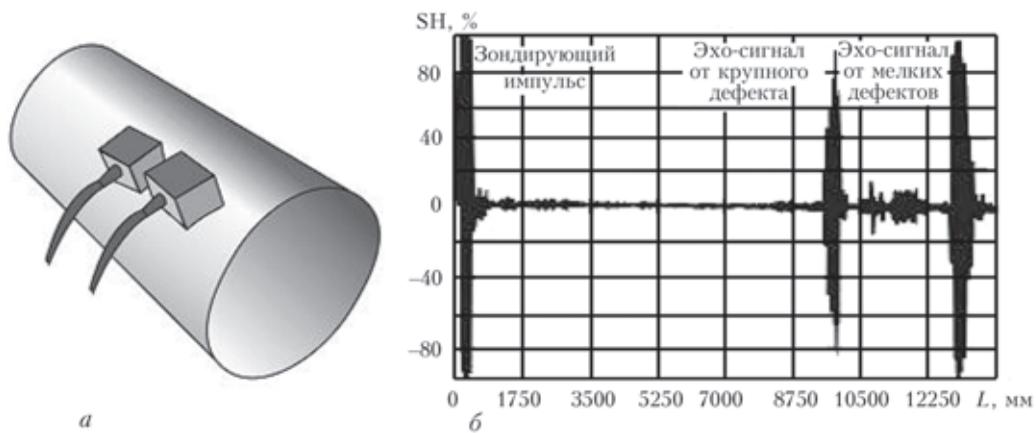


Рис. 15. ЭМА-преобразователи на поверхности трубы (а) и дефектограмма, показывающая наличие в трубе дефектов (б)

- создавать УЗ-колебания SH-поляризации, исключая влияние на результаты УЗК краев валика усиления и провисания металла шва;
- проводить УЗК соединений металлоконструкций из тонкого металла частотой до 1,5 МГц, которые с помощью пьезопреобразователей не могут быть проконтролированы;
- оставлять на поверхности контролируемого изделия остатки изоляции, брызг и т.п., т.е. для контроля не нужна тщательная подготовка поверхности, так как уровень очистки поверхности изделия не оказывает влияния на результаты УЗК методом ЭМА;
- выполнять УЗК при высоких и низких температурах поверхности; в полевых и экстремальных условиях, не дожидаясь остывания металла;
- проводить УЗК без контактной жидкости при наличии зазора между преобразователем и объектом контроля.

На рис. 15 показаны два ЭМА-преобразователя на поверхности трубы (а) и дефектограмма, показывающая наличие в трубе дефектов (б). В ИЭС было разработано несколько проектов реализации магнитоакустического контроля. Этот метод получил распространение для УЗК объектов с высокой температурой поверхности и используется при больших скоростях контроля.

Важной особенностью цифровых методов обработки УЗ-информации явились разработки по визуализации толщинометрии, рельефа обратной стороны (недоступной для контакта) металлоконструкции. На рис. 16 показаны три направления (теневое, с торца и со стороны) представления информации после обработки всех сигналов УЗ, отражающихся от объекта. Так, получают изображение внутренних дефектов в трех (рис. 17) ракурсах, устанавливается рельеф коррозионного поражения внутренней недоступной стороны объекта. Например, вид дефекта с трех сторон, в трех координатах. По характеру расположения отраженных сигналов устанавливают наличие расщепления (рис. 18) и другие дефекты.

Начиная с 1960-х гг., в период начала создания цехов по производству труб высокого давления для магистральных газопроводов создано большое количество установок АУЗК для Харцызского, Выксунского, Челябинского и др. металлургических и трубопрокатных заводов. На рис. 19 показана принципиальная схема установки АУЗК У-664, разработанной для Харцызского трубного завода.

Эффективность НК по-прежнему относится к важным вопросам деятельности института. На рис. 20 показан фрагмент дискуссии по вопросам АУЗК в отделе НК ИЭС с участием академика Б. Е. Патона.

При массовом производстве ответственных конструкций надо было применять различные методы и средства НК, а также непрерывно вести анализ появления дефектов и на этой основе совершенствовать сварочные технологические решения. От уровня ответственности объекта зависят объемы и последовательности процедур НК (рис. 21). Ответственные металлоконструкции типа труб магистральных газопроводов на заводах-изготовителях проходят полный цикл НК-испытаний дважды: до и после экспандирования и гидроиспытаний.

На Харцызском трубном заводе, Выксунском металлургическом заводе, Челябинском трубопрокатном заводе внедрены технологии НК при производстве труб большого диаметра, предназначенных для газопроводов до 100 атм. И на протяжении всего времени применения этих технологий сотрудники ИЭС ведут наблюдения, осуществляют непрерывный процесс совершенствования системы

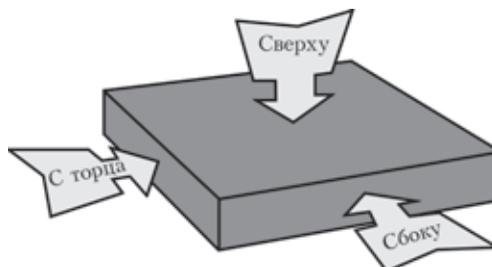


Рис. 16. Три ракурса представления информации об объекте

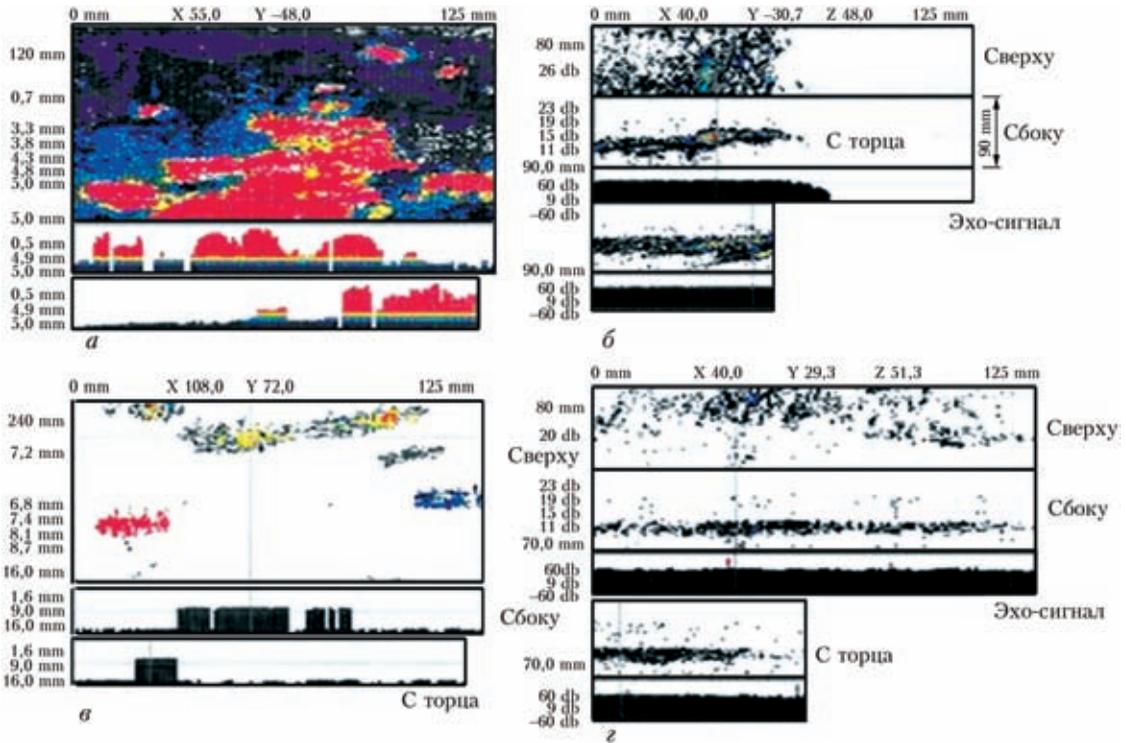


Рис. 17. Остаточная толщина металла сосуда с внутренним коррозионным поражением (а); распределение сигналов при наличии коррозионного поражения внутри металла (гиба паропровода) (б); вид сверху, сбоку и с торца для металла с расслоением (в); распределение УЗ-сигналов питтинговой коррозии внутри металла, каждый отдельный дефект допустим, а металлоконструкция снята с эксплуатации (г)

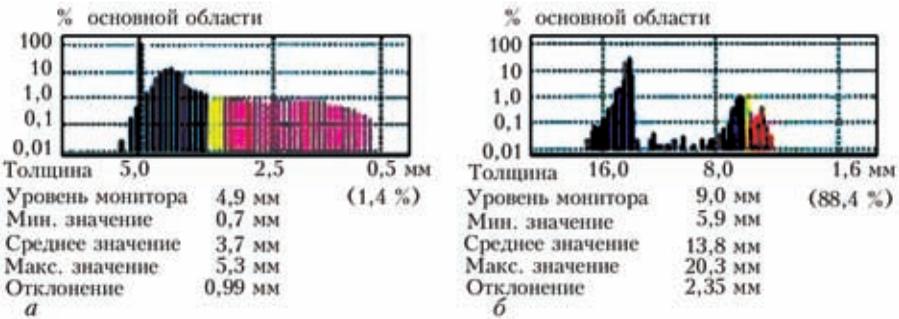


Рис. 18. Распределение УЗ-сигналов: а – при коррозионном поражении; б – при расслоении

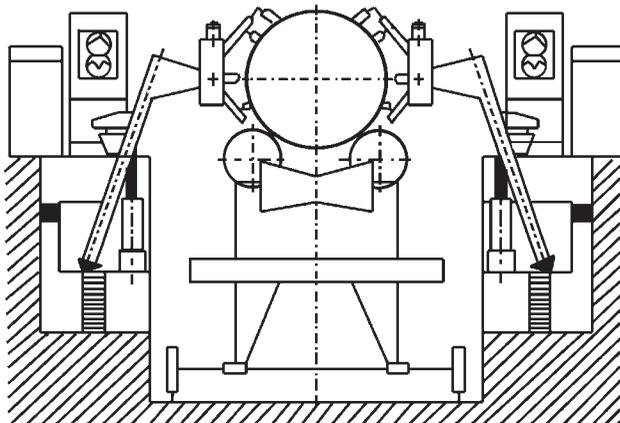


Рис. 19. Принципиальная схема установки АУЗК У-664



Рис. 20. Дискуссия по вопросам АУЗК с участием Б. Е. Патона



НК с расширением возможностей взаимодействия методов и введением новых решений. Поэтому, как показывает анализ аварий на газотранспортных системах, первопричиной разрушений преимущественно являются монтажные, а не заводские сварные швы. Этот вывод является результатом постоянного анализа весовых соотношений дефектов различного вида и размеров при изготовлении труб, текущего уровня их дефектности. Так, оценивают динамику качества, определяют правомерность использования выбранной технологии сварки. Таким образом, происходит поддержание высокого качества продукции (труб), которое многократно оценивается рентгеновским, магнитным и ультразвуковым контролем (табл. 1).

Анализ количественного соотношения дефектов различного вида в сварных соединениях труб большого диаметра показывает, что более 80 % дефектов – объемные. Это поры и шлаковые включения. Относительное количество наиболее потенциально опасных плоскостных дефектов (непроваров и трещин) составляет около 10 %. Плоскостные дефекты увеличивают раскрытие после экспандирования и гидроиспытаний, так как в процессе этих процедур растягивающие усилия достигают 0,9 предела текучести. Поэтому трубы для газопроводов после экспандирования и гидроиспытаний проходят повторный полный цикл НК. Причем на сдаточном УЗК поперечных трещин обнаруживается в 2...10 раз больше, т. е. трещины после экспандирования раскрываются сильнее непроваров. Для того, чтобы внедрить такой большой объем НК потребовались многие годы и изнурительные доказательства важности расширения системы НК, насыщения ее разными методами.

Технология НК в трубосварочном производстве предполагает исследования дефектных участков также с помощью ручного УЗК, пленочной радиографии, дополняющей рентгенотелевизионный метод, и металлографии, магнитопорошкового, вихретокового методов (по желанию заказчика). Ручным УЗК подтверждается 86 % дефектов, из которых недопустимых приблизительно 28 %.

Критерием истины считается радиография. Исследования дефектных участков с помощью пленочной радиографии и металлографии показали, что результаты УЗК подтверждаются большим процентом недопустимых дефектов. По отражающей способности естественные дефекты различны. Например, мелкие строчечные включения в основном металле дают гораздо большую амплитуду эхо-сигнала, чем подлежащие обязательному исправлению шлаковые включения и поры в шве. Поэтому, с одной стороны, амплитуда эхо-сигнала при УЗК не является однозначной мерой оценки мест отражения, а, с другой, чувствительность контроля не может быть 100%-ной, без пропуска дефектов, подлежащих исправлению. Следовательно, философия допустимости труб к эксплуатации должна постоянно трансформироваться.

Результаты основных средств АУЗК и РТК зависят от многих обстоятельств. В табл. 2 приведены количественные соотношения дефектов, полученные при близких технологических процессах в трубах из сталей марок X-70, 09Г2ФБ, 10Г2ФБ. Видно, что больше всего труб (до 40 %) забраковано при АУЗК труб из стали марки 10Г2ФБ. В то же время после РТК отправлено на ремонт всего 16,7 % труб. АУЗК фиксирует, что большое количество дефектов связано с плохим качеством металла исходного листа, наличием на кромках



Рис. 21. Полный цикл контроля труб магистральных трубопроводов

Т а б л и ц а 1. Количественное соотношение труб с различными дефектами (ТРД) и количество образующихся в трубах дефектов определенного вида (ТДОВ) на сдаточном и технологическом участках НК трубного завода (данные взяты из годовой программы около 200000 шт. газовых труб)

Вид дефекта	ТРД, % (до)	ТДОВ, % (до)
Непровар	2,0	10,0
Поры + шлаки	1,5	4,0
Поры	13,0	50,0
Шлаки	4,0	18,0
Трещины продольные	0,1	0,5
Трещины поперечные	0,1	0,5
Прожоги	0,1	0,5
Другие дефекты	4,0	16,0

Т а б л и ц а 2 . Количественные соотношения дефектов в трубах, полученные при близких технологических процессах

Результаты НК	Технологический участок НК			Сдаточный участок НК		
	Х-70	09Г2ФБ	10Г2ФБ	Х-70	09Г2ФБ	10Г2ФБ
Проконтролировано труб АУЗК, шт.	8594	5485	2900	8784	5095	2583
Трубы, забракованные АУЗК, %	19,4	16,2	40,0	20,0	11,7	21,1
Проконтролировано труб РТК, шт.	3048	1164	1318	3170	775	779
Отправлено на ремонт по РТК	23,6	33,7	16,7	4,8	5,4	1,8
В том числе труб по видам дефектов, %						
Непровар	0,8	1,2	0,5	0,2	0,2	-
Непровар на конце трубы	0,3	0,6	0,5	0,06	0,2	-
Поры + шлаки	0,7	1,5	0,7	0,09	-	0,1
Поры	15,4	21,6	9,3	3,8	4,3	1,0
Шлаки	2,6	2,7	3,0	0,3	0,4	0,3
Трещины поперечные	0,2	0,2	0,08	0,09	0,1	0,3
Трещины продольные	0,07	-	-	0,2	0,2	0,1
Прожоги	0,2	0,2	0,2	0,06	-	-
Другие дефекты	3,3	5,6	2,6	-	-	-

расслоений и раскатанных строчечных включений металлургического характера.

Дефекты типа строчечных включений, имея хорошие отражательные свойства для ультразвука, дают повышенный процент браковки труб. В то же время, располагаясь на пути УЗ волны, они рассеивают УЗ колебания и могут «маскировать» дефект, ухудшая его выявляемость.

Начиная с 1970-х гг., работы по автоматизации УЗК и совершенствованию системы НК не останавливались ни на один день – они велись совместно с ВНИСТ, ВНИИНК и др. НИИ. Непрерывно совершенствуется элементная база, внедряются компьютеризированные цифровые методы и средства обработки информации (рис. 22).

Вскоре после событий на Чернобыльской АЭС был принят ряд европейских программ по изучению и преодолению последствий этой аварии. Сотрудники ИЭС принимали активное участие в их выполнении, помогали восстанавливать и запускать в 1986 г. третий реактор на ЧАЭС, контролировали качество сооружаемых трубопроводов и других металлоконструкций в зоне ЧАЭС, изготавливали дозиметры, внедряли дозиметрию про-



Рис. 22. Фрагмент настройки промышленных установок автоматизированного УЗК на эталонной трубе

дуктов в прилегающих к ЧАЭС районах. Одной из программ ЕС, связанной с трагедией на ЧАЭС, было внедрение европейских правил и средств НК ответственных металлоконструкций на основе датской системы Р-scan (рис. 23), внедрение которой в Украине сыграло важную роль в развитии цифровых компьютеризированных систем в Советском Союзе.

Для изучения этих правил большая группа сотрудников ИЭС проходила стажировку в Копенгагене (Дания) в Институте Force и получила международные сертификаты. Со временем появились подобные отечественные системы. На рис. 23 показаны фрагменты системы Р-scan, используемой в ИЭС с 1988 г., и процесс ее изучения болгарским специалистом, выполняющим межгосударственную программу развития технологий НК для АЭС.

Одним из важнейших достижений ИЭС являются работы по изучению возможностей низкочастотного (НЧ) дальнего действия УЗК, позволяющего изучать длинномерные конструкции без сканирования их поверхности (рис. 24).

НЧ УЗ-система для определения коррозионного износа и других крупных повреждений трубопроводов дает возможность оценивать техническое состояние всего объекта в обе стороны от места расположения антенны. В основу действия системы положен принцип анализа отраженных низкочастотных направленных волн, способных распространяться на большие расстояния. При этом обнаруживаются коррозионные поражения и другие дефекты потери металла, глубина которых не менее 10 % толщины стенки трубы на расстоянии до 100 м.

На рис. 25 показана схема контроля экспериментального трубопровода протяженностью 48 м, состоящего из шести труб с искусственными



Рис. 23. Система P-scan

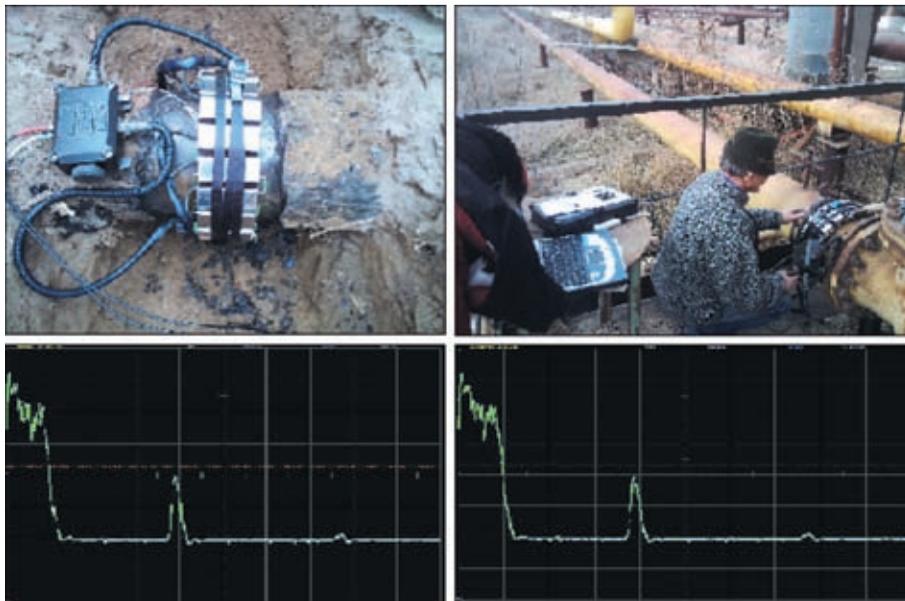


Рис. 24. Антенна на трубе тепломагистрали, с помощью которой производят УЗК трубопровода без сканирования ее поверхности

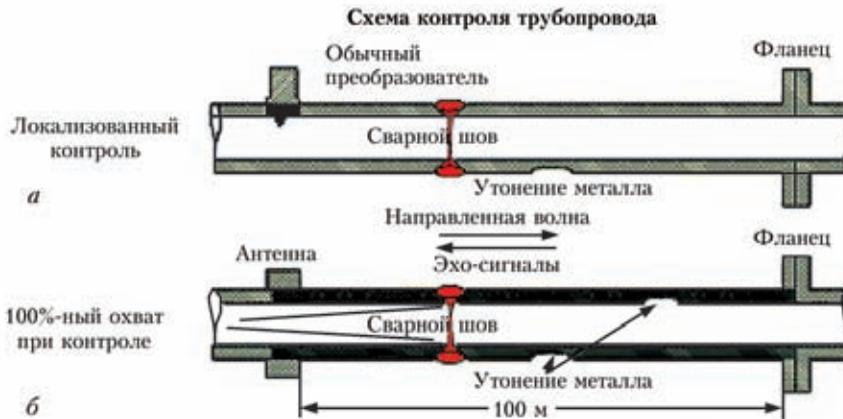
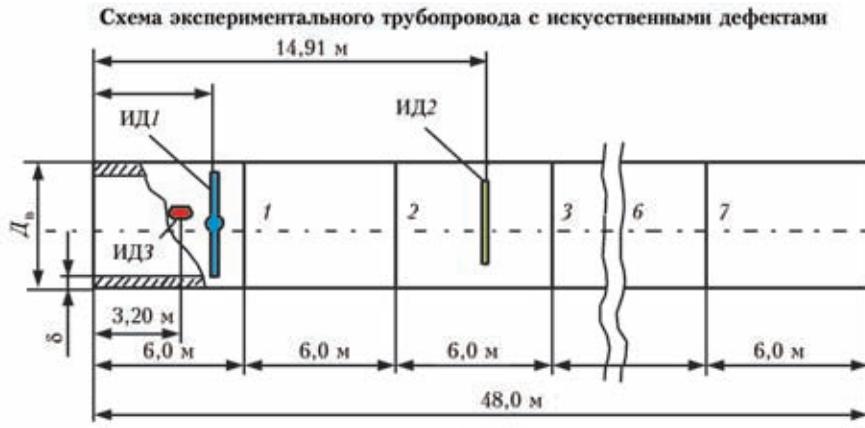
дефектами, экспериментальная установка и дефектограммы трубопровода. Начало этого перспективного научного направления в дефектоскопии было положено в 2004 г. Позже с этими разработками сотрудники ИЭС приняли участие в выполнении программы европейского проекта LRUT, в котором под руководством английского Института TWI также приняли участие ученые из 11 стран Европы. На рис. 25 показано разработанное оборудование, установленное на трубах. Приняты следующие обозначения: 1–7 – сварные швы; ИД1, ИД3 – искусственные дефекты: ИД1 – прорез со сквозным отверстием, ширина прореза 2,5 мм, глубина 2,5 мм, длина 0,5L, где L – длина окружности трубы, диаметр отверстия 10 мм; ИД2 – прорез шириной 2,5 мм, глубиной 2,5 мм, длиной 0,3L; ИД3 – коррозионное поражение длиной 0,18 м, шириной 0,1 м. На дефектограмме видны все монтажные кольцевые соединения (разные по качеству), все искусственные упомянутые выше дефекты.

Первые стандарты по НЧ методу контроля начали появляться совсем недавно: итальянский стандарт UNI/TS 11317 – 2009 г., японский стандарт JIS – NDIS 2427 – 2010 г. и американский ASTM E2775-11 – 2011 г. Сейчас НЧ диагностика

– один из наиболее быстро развивающихся методов НК трубопроводов.

На западный рынок выходит уже третье поколение этих систем. Прошла эйфория об универсальности НЧ УЗК. Уже четко определены ограничения применения этого метода и зоны ее наиболее эффективного использования. Есть принципиальные отличия от обычной УЗ-дефектоскопии. Этот метод не позволяет напрямую определять локальные изменения толщин стенок и внутренние неоднородности контролируемого объекта по времени прохождения отраженного сигнала. Изменения толщин стенок в данном случае определяются не временем, а характером отраженного сигнала (его амплитудой, формой), а время появления отраженного сигнала соответствует расстоянию от антенны до дефектного участка. Здесь действует иная интерпретация результатов контроля. Полезный сигнал от дефекта может маскироваться многократно превосходящими его по амплитуде сигналами от сварных швов, фланцев, колен трубы, ответвлений. Эхо-сигнал значительно ослабляется при отражении от дальних участков трубопроводов.

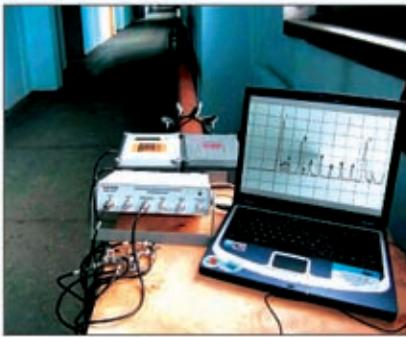
Неоспоримое преимущество длинноволнового метода НЧ контроля – это возможность



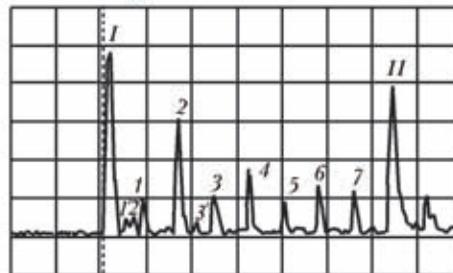
**Методика проведения контроля длинноволновым УЗК**

1. Установка антенны датчиков на трубопровод
2. Направленное прозвучивание трубопровода с одной точки
3. Выдача диаграммы контроля и предварительных результатов с указанием дефектов

**Рабочее место оператора УЗ-контроля**



**Излучения с конца трубы, крутильная волна**



*I* – начальный (зондирующий) сигнал  
*II* – эхо-сигнал от торца трубы  
*1* – *7* – эхо-сигналы от сварных соединений

*1'*, *2'*, *3'* – эхо-сигналы от искусственных дефектов ИДЗ, ИД1, ИД2 соответственно

Рис. 25. Схема контроля экспериментального трубопровода: *a* – обычными методами; *б* – длинноволновым УЗК

достаточно быстро выявлять наиболее критические участки трубопроводов без сканирования их поверхности, без их вскрытия и выкапывания, что особенно важно в труднодоступных участках. Поэтому в первую очередь такие системы в Украине используют для диагностики:

- пересечения трубопроводами дорог; прохождения их через стену;
- однотипности монтажных кольцевых швов секции труб, которых может быть несколько десятков;
- в случае использования разных типов опор с

зонами коррозионного поражения;  
 – коррозии под изоляцией и т. п.

Сравнительные результаты измерения координат искусственных дефектов на трубопроводе протяженностью 48 м и сварных соединений получены с помощью НЧ УЗ-контроля по представленной на рис. 25 осциллограмме и приведены в табл. 3. Расстояние до сварных швов и дефектов вычислялось по формуле  $L = \frac{vt}{2}$ , где  $t$  – время прохождения отраженного эхо-сигнала на осциллограмме;



$v$  – скорость распространения НЧ-ультразвука для торсионных волн.

Как видно из табл. 3, точность измерения расстояний вдоль оси трубы для такого интегрального метода достаточно высокая.

Экспериментальные обследования в Крыму открытых участков газопровода Красноперекопского бромзавода (рис. 26, а) (труба диаметром 330 мм, толщина стенки 8 мм) показали потенциальные возможности использования этого метода для обследования участков трубопроводов на расстоянии до 150 м от установленной антенны. Там же проводили обследования подземного участка газопровода, покрытого усиленной противокоррозионной брызольной изоляцией толщиной 9 мм (рис. 26, б). В этом случае акустические волны практически сразу же затухали.

Интегральные исследования по определению возможности выявления коррозионных поражений длинноволновым методом в 2012 г. проводили на складе-полигоне труб ТЭЦ в г. Вишневое. Исследования проводили с использованием достаточно большого количества новых и бывших в употреблении труб с различными видами защитной изоляции.

Было экспериментально подтверждено, что для битумных покрытий дальность акустиче-

ского контроля трубопроводов не превышает 1...3 м и упругие волны достаточно хорошо проходят по трубам с теплоизоляцией, например, подобной пенопласту и гидроизоляции. Данная технология (НЧ УЗК) должна найти широкое применение на многочисленных объектах Украины, России и сопредельных стран. Это многочисленные «вспомогательные», технологические трубопроводы на газо- и нефте-разработках, трубопроводных нефте-, газо-, химических производств; вновь строящиеся газо-, нефтепроводы с большим количеством монтажных кольцевых швов, каждый имеющий свой акустический портрет.

Бурное развитие полупроводниковой техники, цифровых методов обработки изображений стимулировало интенсивное совершенствование и широкое применение на практике термографии. Тепловой метод НК (термические краски, тепловизионное оборудование, полупроводниковые элементы и др. атрибуты) в ИЭС применялись достаточно давно (рис. 27). Это дистанционный и очень эффективный метод НК.

В ИЭС в 2011–2012 гг. была выполнена работа по дефектометрии при термографии. Несмотря на то, что в настоящее время появилось много техники для термографических иссле-

**Таблица 3. Сравнительные результаты измерения координат искусственных дефектов**

Координаты дефекта	ИД1	1	2	ИД2	3	4	5	6	7	Торец
Рассчитанные по УЗК, м	4,15	6,05	12,12	14,97	18,35	24,48	30,78	36,59	42,88	48,68
Измеренные рулеткой, м	4,25	6,04	12,09	15,25	18,34	24,45	30,56	36,62	42,69	48,69

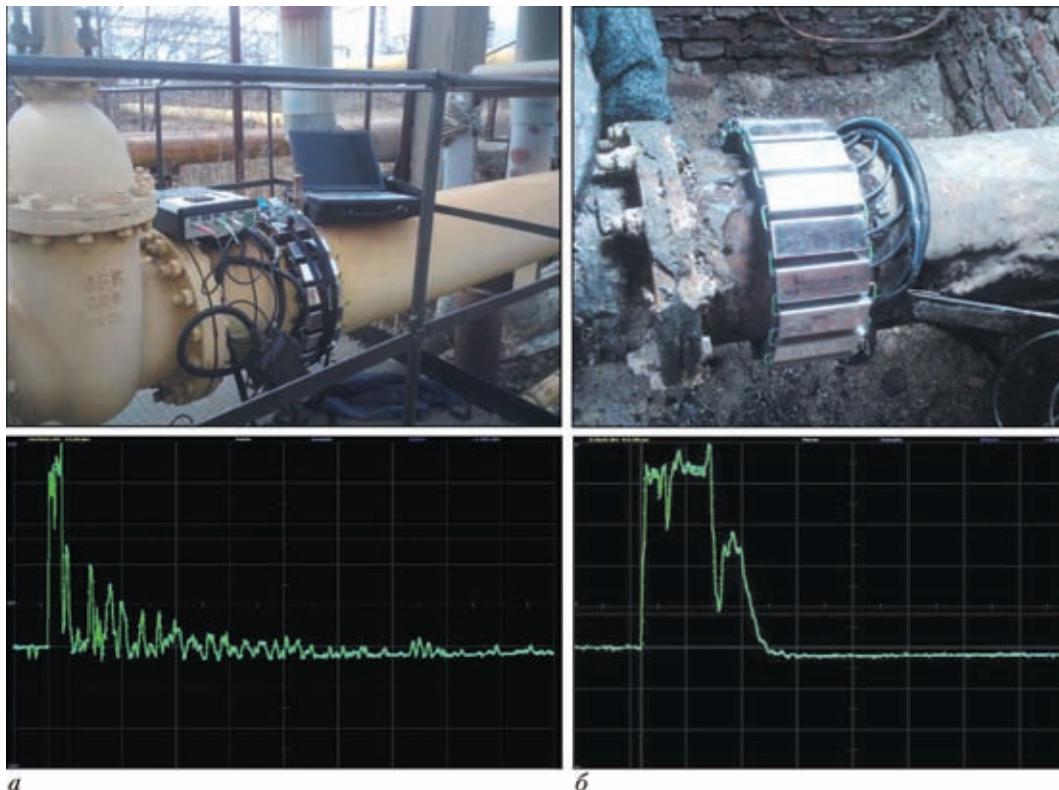


Рис. 26. Обследование открытых (а) и подземных (б) участков Красноперекопского газопровода

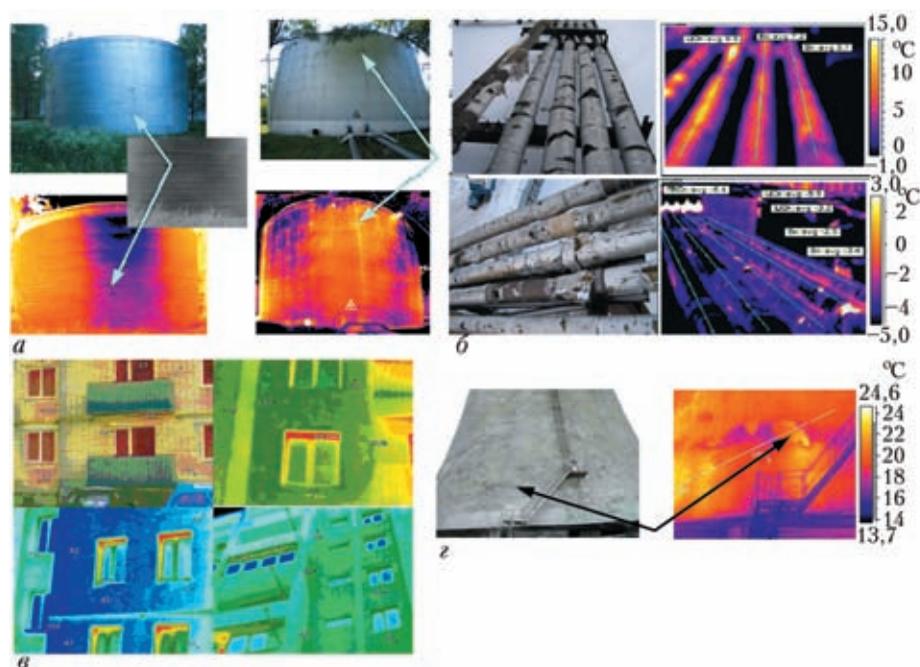


Рис. 27. Термографическое обследование резервуаров (а), трубопроводных магистралей (б), промышленных и гражданских зданий (в), градирен (г) (стрелками обозначены участки с возможными дефектами)

дований, пока нет средств для дистанционных измерений обнаруженных площадей зон потери тепла, глубины поражения. Созданы лазерно-термографические измерительные системы, позволяющие определять дистанционно координаты и геометрические параметры дефектов потенциально опасных потерь тепла. В результате исследований было разработано измерительное лазерно-термографическое устройство и соответствующее ему программное обеспечение для определения координат и геометрических размеров дефектов, обнаруженных при термографии.

Данное программное обеспечение позволяет рассчитать площадь дефекта, который обнаруживается с помощью тепловизионной камеры, представить обнаруженный дефект в графическом виде, а также построить его объемное изображение.

Дефектометрия при термографии – новое важное научное направление, которое должно получить развитие.

Таким образом, в области дефектоскопии в последние годы в ИЭС разработаны методические основы обнаружения дефектов при радиографии и созданы статистические эталоны, повышающие качество расшифровки радиограмм и обнаружение тонких трещиноподобных дефектов с малым раскрытием.

Изучено взаимодействие НЧ-антенны и протяженного объекта контроля. Предложены конструкции антенн и аппаратуры для их возбуждения и обработки НЧ-информации.

Исследован акустический тракт теневого УЗ дефектоскопа с использованием коротко- и длиннофокусных импульсных ЭМА-преобразо-

вателей, что повышает вероятность обнаружения расслоений и коррозионных поражений в сварных листовых конструкциях.

Создана технология тангенциальной рентгенографии и рентгеноскопии для измерения толщины стенки труб, изоляции и внутреннего заполнения без вывода ее из эксплуатации.

Выполнены исследования аномалий собственного магнитного поля объекта при механических напряжениях, что позволило предвидеть возникновение усталостных трещин.

Исследованы возможности магнитооптического метода для выявления тонких дефектов без промежуточного носителя информации о магнитных полях рассеяния в виде никелевой ленты.

Разработана рентгенотелевизионная система на основе ПЗС-матриц и флуоресцирующих экранов, открывающая реальные возможности для многочисленных вспомогательных объектов нефте-, газораспределительных комплексов, которые до сих пор не обеспечены НК.

Внедрены методики оценки размеров внутренних трещиноподобных дефектов, низкотемпературных сероводородных расслоений на основе методов TOFD, SAFT, фазированных решеток при УЗК, например, на ОАО «Лукойл-Карпатнефтехим», на больших мостовых и других металлоконструкциях.

Широко внедряется тепловой метод НК, заложены основы термографической дефектометрии.

Продолжается разработка систем автоматизированного контроля с использованием пьезо- и ЭМА возбуждения УЗ-волн для выявления дефектов типа расслоений в прикромочных зонах



сварного шва и основного металла труб; ведутся разработки автоматизированных систем распознавания образа дефекта в результате УЗ-контроля, что воплощается в новых АУЗК установках.

При ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины работают Межотраслевой учебный центр, Центр сертификации и Аттестационный центр НК, которые готовят специалистов этой профессии по международным стандартам ISO 9712, EN-473 и др. Начало этой деятельности по НК было положено общим приказом Национальной академии наук Украины, Государственного комитета Украины по стандартизации, Государственного комитета Украины по надзору за охраной труда, который учредил Национальный комитет по неразрушающему контролю (НАК). Позже был создан Технический комитет по стандартизации ТК-78 «Техническая диагностика и неразрушающий контроль».

Практически по всем методам НК в ИЭС выпущены учебные пособия, издается бюллетень «НК-информ», журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль».

В Украине в 2012 г. издан справочник «Неразрушающий контроль в Украине», в котором представлено реальное положение дел в стране по этому важному научно-техническому направлению, приведены сведения о всех организациях, работающих в этой области, отмечена роль НАН Украины в становлении этого наукоемкого направления.

Следует отметить, что участие в европейских и всемирных конференциях по НК в Копенгаге-

не (7-я ECNDT, 1998 г.), Риме (15-я WCNDT, 2000 г.), Барселоне (8-я EFNDT, 2002 г.), Монреале (16-я WCNDT, 2004 г.), Берлине (9-я EFNDT, 2006 г.), Шанхае (17-я WCNDT, 2008 г.), Москве (10-я EFNDT, 2010 г.), Дурбане (18-я WCNDT, 2012 г.) послужило развитию передовых методов НК в Украине.

Сотрудники ИЭС им. Е. О. Патона работают в Европейской федерации по НК и Всемирной организации ICNDT, являются членами ТК-135 ISO. Дефектоскописты ИЭС сотрудничают с международными ANDTI, ISO, CEN, IAEA и другими организациями России, Беларуси, Молдовы, Польши, Чехии, Болгарии, Хорватии, Италии, США, Кореи и других стран. Участие в Европейском научном проекте «Мониторинг состояния объектов с помощью дальнедействующего ультразвука (LRUCM), выполняемого по 6-й Рамочной программе ЕС, проекте «Ship Inspector», касающегося создания технических средств для определения зон усталости и предразрушений морских сооружений способствует распространению в Восточной Европе передовых методов НК. Основной целью проекта Ship Inspector является развитие новых технологий для обнаружения дефектов и коррозий в критических зонах кораблей без извлечения их из воды.

Признанием заслуг ИЭС им. Е. О. Патона в области дефектоскопии является регулярное присутствие специалистов из разных стран, желающих повысить свой уровень знаний в НК.

The paper shows the role of E.O.Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine as one of the leading scientific organizations, which has made a significant contribution to development and formation of the system of nondestructive testing control in industry. The main PWI developments in the field of ultrasonic, radiation, magnetic and other methods of nondestructive testing of welded joints and metal products are considered, which have been successfully introduced at the enterprises of Ukraine and Russia. The paper presents the results of investigations on development of modern nondestructive testing technologies: TOFD, SAFT, EMA, directed wave ultrasonic inspection, numerical radiography, etc. Activity on harmonizing the European and development of national standards and industry normative documents in the nondestructive testing field is described. Questions of international cooperation in the field of joint research and training of personnel on nondestructive testing in keeping with international standards are briefly discussed.

*Keywords* : E.O.Paton Electric Welding Institute of NASU, nondestructive testing of welded joints, developments in the field of NDT, development of national standards

Поступила в редакцию  
24.10.2013

# ВЛИЯНИЕ ЛОКАЛЬНОГО СКОПЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В ПЛАСТИНАХ

## Сообщение 1

А. Я. НЕДОСЕКА, С. А. НЕДОСЕКА

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

Рассмотрены процессы искажения акустических волн, вызванные наличием дефектов в пластинах. Задача решена для плоского случая, когда в пластине движется единственная цилиндрическая волна со скоростью  $C_1$ . Показано, что этот вариант может быть приемлем для расстояний порядка 5 см и более от места приложения источника возбуждения волны. Разработана специальная компьютерная программа, позволяющая проводить аналитические исследования распространения цилиндрических волн в пластинах при любых значениях параметров, характеризующих форму и величины перемещений распространяющейся волны. Результаты выполненных расчетов могут быть использованы на практике для оценки некоторых критериальных параметров образования и распространения АЭ волн. В частности, показано, что сопротивление распространению акустических волн оказывает плотность и размеры области с дефектами, в результате чего появляются волны, отраженные от дефектной области. С увеличением коэффициента сопротивления форма волн, преодолевших акустический барьер, существенно меняется. Расчеты, выполненные с использованием разработанной модели, показали, что наличие дефектов структуры материалов, выражающиеся в увеличении акустического сопротивления областей, содержащих эти дефекты, приводит к появлению отраженных волн, распространяющихся симметрично в обе стороны от цилиндрической поверхности с дефектами, а сама поверхность становится источником излучения. Библиогр. 9, рис. 6.

*Ключевые слова:* акустическая эмиссия (АЭ), АЭ сканирование, волны деформаций, математическое моделирование физических процессов

В работах [1, 2] рассмотрено влияние дефектов структуры материалов на распространение акустических волн в тонких стержнях. Исследования показали, что основное влияние оказывает плотность и сосредоточенность дефектов в ограниченной области стержня. В настоящей работе рассмотрим это явление в пластинах. Процессы распространения упругих волн в пластинах гораздо сложнее, чем в стержнях [3, 4] поэтому задачу будем решать для более простого плоского варианта, когда в пластине движется одна цилиндрическая волна со скоростью  $C_1$ . Этот вариант может быть приемлемым для расстояний порядка 5 см и более от места приложения источника возбуждения волны. На меньших расстояниях картина перемещений на верхней и нижней поверхностях пластины существенно отличаются. Перемещения, вызванные переотражениями от поверхностей, на удалении от центра излучения достаточно малы по сравнению с главным значением двигающегося импульса. На рис. 1 представлена картина волн на нижней и верхней поверхностях пластины толщиной 1 см в момент  $C_1 t = 120$  и 700 см. Графики получены по формулам для пластин с учетом переотражения волн от нижней и верхней поверхностей [5]. В расчетах приня-

то:  $\alpha = 1 \dots 10 \text{ см}^{-1}$ ;  $\Delta\alpha = 0,0001 \text{ см}^{-1}$ ;  $C_\alpha/C_1 = 1 \dots 3$ ;  $\Delta(C_\alpha/C_1) = 0,1$ ;  $z_0 = 0,2(0,8) \text{ см}$ ;  $C_1 t = 120$  и 700 см. Как видно, значения перемещений  $w$  резко уменьшаются примерно через  $\pm 15 \text{ см}$  по обе стороны максимального значения АЭ импульса, а сами перемещения незначительно отличаются по амплитуде и сдвинуты по отношению друг к другу с разницей между амплитудами максимальных значений (в рассматриваемом случае равной 3 см). С некоторыми допущениями для расчетов параметров волны можно принять, что по верхней и нижней сторонам пластины перемещаются одинаковые импульсы АЭ с небольшим сдвигом.

Учитывая изложенное, целесообразно применить упрощенное дифференциальное уравнение симметричной задачи для тонкой пластины без учета переотражений от верхней и нижней поверхностей. Такое уравнение будет иметь вид [3, 6]:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} - \frac{1}{C_1^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - \\ & - 2\pi\alpha_n [S(r-r_1) - S(r-r_2)] \beta \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \\ & = -\frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{V_0}{2\pi r \delta} \delta(r) \delta(t), \end{aligned} \quad (1)$$

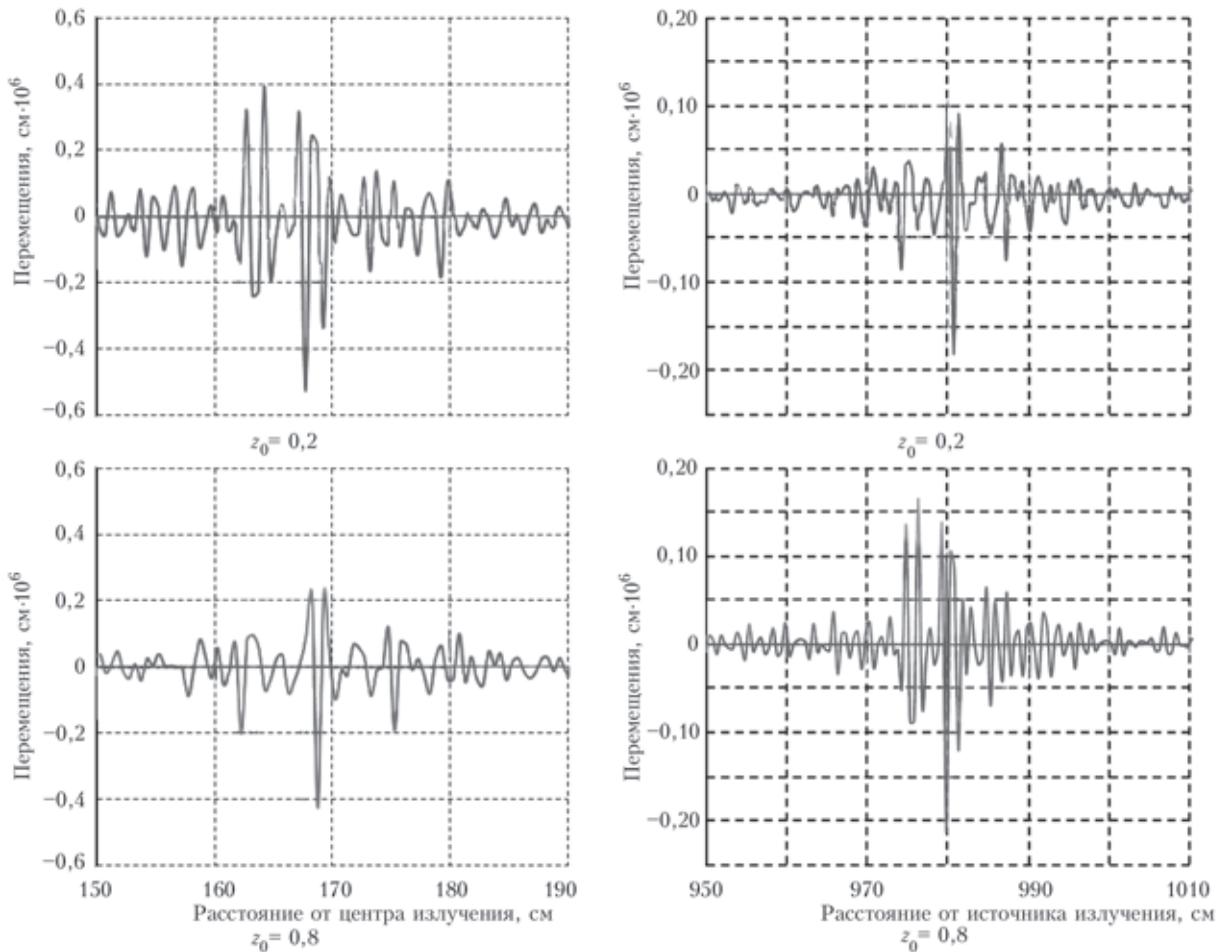


Рис. 1. Перемещения на нижней и верхней поверхностях пластины толщиной 1 см на разных расстояниях от центра излучения, вызванные источником  $\epsilon_0 C_1 = 1 \cdot 10^{-4}$ , возникшим на глубине 0,2 и 0,8 см от ее верхней поверхности

где  $\varphi$  – функция напряжений,  $\text{см}^2$ ;  $S$  – единичная функция, ограничивающая область с дефектами координатами  $r_1$  и  $r_2$ ;  $\beta$  – коэффициент сопротивления области с дефектами,  $\text{с}/\text{см}$ ;  $V_0$  – мгновенное изменение объема материала,  $\text{см}^3$ ;  $\delta$  – толщина пластины,  $\text{см}$ ;  $\delta(r)$  и  $\delta(t)$  – функции Дирака, определяющие сосредоточенность и время действия источника возмущения,  $\text{см}^{-1}$  и  $\text{с}^{-1}$  соответственно;  $R, t$  – соответственно расстояние от источника возмущения,  $\text{см}$  и время,  $\text{с}$ ;  $w$  – перемещения в направлении оси  $z$ ,  $w = -v \partial \varphi / \partial r$ .

Перепишем формулу (1) в более удобном для расчетов виде. При этом коэффициент в уравнении (1)  $2\pi \alpha_n [S(r - r_1) - S(r - r_2)] \beta$  (2) учтем поэтапно – сначала как действующий на бесконечно тонком кольце радиуса  $r_0$  (рис. 2), затем путем интегрирования результата перейдем к задаче с коэффициентом (2). Таким образом, на первом этапе ищем решение уравнения

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} - \frac{1}{C_1^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - 2\pi r_0 \alpha_n \delta(r - r_0) \beta \frac{\partial \varphi}{\partial t} = -\frac{1+v}{1-v} \frac{V_0}{2\pi r \delta} \delta(r) \delta(t) \quad (3)$$

для пластины конечных размеров радиуса  $a$ . При этом  $a$  может приобретать любые размеры. Начальные условия предполагают мгновенное приложение возмущения  $V_0$ . На границе  $r = a$  функция перемещений принята равной нулю ( $\varphi = 0$ ). Влияние отраженного от границы  $r = a$  импульса будем уменьшать за счет увеличения границы  $a$  до

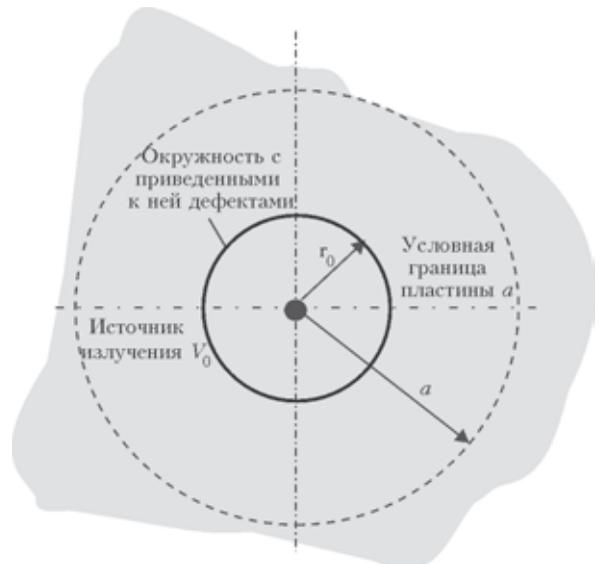


Рис. 2. Схема пластины с источником возмущения и поясом сосредоточения дефектов структуры материала



величин, при которых это условие будет выполнено. Выполнив прямые и обратные преобразования Лапласа по времени и Ханкеля по координате  $r$ , получим для бесконечно тонкого слоя на расстоянии  $r_0$  от центра [3, 7, 8]:

$$\varphi = \frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{V_0 C_1}{a^2 \pi \delta} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0(a_n r) / J_1^2(a_n a)}{a_n \sqrt{1 - \left( \frac{2\pi a_n \beta C_{10} r_0^2 J_0^2(a_n r_0)}{a^2 J_1^2(a_n a)} \right)^2}} \times$$

$$\times \exp\left(-\frac{2\pi a_n \beta C_{10}^2 r_0^2 J_0^1(a_n r_0)}{a^2 J_1^2(a_n a)} t\right) \times$$

$$\times \sin\left(a_n C_1 t \sqrt{1 - \left( \frac{2\pi a_n \beta C_{10} r_0^2 J_0^2(a_n r_0)}{a^2 J_1^2(a_n a)} \right)^2}\right)$$

или  $\text{sh}\left(a_n C_1 t \sqrt{\left( \frac{2\pi a_n \beta C_{10} r_0^2 J_0^2(a_n r_0)}{a^2 J_1^2(a_n a)} \right)^2 - 1}\right)$

и  $\sqrt{\left( \frac{2\pi a_n \beta C_{10} r_0^2 J_0^2(a_n r_0)}{a^2 J_1^2(a_n a)} \right)^2 - 1}$ , если подкоренные

выражения в формуле отрицательные.

Дифференцируя далее выражение для  $\varphi$  по  $r$ , получаем перемещения вдоль радиуса  $u$ :

$$u = -\frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{V_0 C_1}{\pi a^2 \delta} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\frac{J_1(a_n r)}{J_1^2(a_n a)}}{\sqrt{1 - \left( \frac{2\pi \beta C_{10} r_0^2 J_0^2(a_n r_0)}{a^2 J_1^2(a_n a)} \right)^2}} \times$$

$$\exp\left(-\frac{2\pi a_n \beta C_{10}^2 r_0^2 J_0^2(a_n r_0)}{a^2 J_1^2(a_n a)} t\right) \times \quad (4)$$

$$\times \sin\left(a_n C_1 t \sqrt{1 - \left( \frac{2\pi \beta C_{10} r_0^2 J_0^2(a_n r_0)}{a^2 J_1^2(a_n a)} \right)^2}\right),$$

$$u = -\frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{V_0 C_1}{\pi a^2 \delta} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\frac{J_1(a_n r)}{J_1^2(a_n a)}}{\sqrt{1 - \left( \frac{2\pi \beta C_{10} r_0^2 J_0^2(a_n r_0)}{a^2 J_1^2(a_n a)} \right)^2}} \times$$

$$\times \exp\left(-\frac{2\pi a_n \beta C_{10}^2 r_0^2 J_0^2(a_n r_0)}{a^2 J_1^2(a_n a)} t\right) \times$$

$$\times \text{sh}\left(a_n C_1 t \sqrt{1 - \left( \frac{2\pi \beta C_{10} r_0^2 J_0^2(a_n r_0)}{a^2 J_1^2(a_n a)} \right)^2}\right), \quad (5)$$

где  $J_0(a_n r) = \sqrt{\frac{2}{\pi a_0 r}} \cos(a_n r - \frac{\pi}{4});$

$$J_1(a_n r) = \sqrt{\frac{2}{\pi a_n r}} \cos(a_n r - \frac{3\pi}{4}).$$

Здесь, как и ранее спектральное уравнение рассчитывается для положительных значений корней  $\alpha_n$  и представляется выражением  $J_0(a_n a) = 0$ .

В представленных формулах необходимо учитывать знак в подкоренных выражениях

$$1 - \left( \frac{2\pi \beta C_{10} r_0^2 J_0^2(a_n r_0)}{a^2 J_1^2(a_2 a)} \right)^2.$$

Если это выражение больше нуля, то для расчета применяется формула (4); если меньше нуля – формула (5).

Перемещения в пластине в случае наличия цилиндрической области сопротивления радиусом  $r_1$  и глубиной  $\Delta r$ , равной  $r_2 - r_1$ , получим путем простого интегрирования выражений (4), (5) в пределах действия области сопротивления. В этом случае формула для расчета перемещений в сокращенном виде будет:

$$u_{\Delta} = \int_{r_1}^{r_2} \frac{2r_0}{r_2^2 - r_1^2} u dr_0,$$

где вместо  $u$  подставляется его значение из выражения (4);  $\Delta$  определяет размер области повышенного сопротивления ( $\Delta = r_2 - r_1$ ).

Перемещения в направлении, перпендикулярном плоскости пластины  $w$ ; найдем, суммируя перемещения, вызванные деформациями  $\epsilon_r$  и  $\epsilon_{\theta}$  по формуле [3]:

$$w = -\frac{\delta \nu}{E} (\sigma_r + \sigma_{\theta}) = -\frac{\nu \delta}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) = \frac{\nu \delta a_n^2 \varphi}{(1+\nu)(1-2\nu)}. \quad (6)$$

Подставив в эту формулу выражение для функции перемещений  $\varphi$ , получим искомую величину.

На рис. 3 приведены значения  $w$  для пластины толщиной 1 см в диапазоне волновых чисел  $1 \leq \alpha \leq 10$ . Максимальные значения амплитуд волн, показанных на рис. 1 и 2, отличаются незначительно, но по координате не совпадают. Последнее объясняется тем, что в реальной пластине

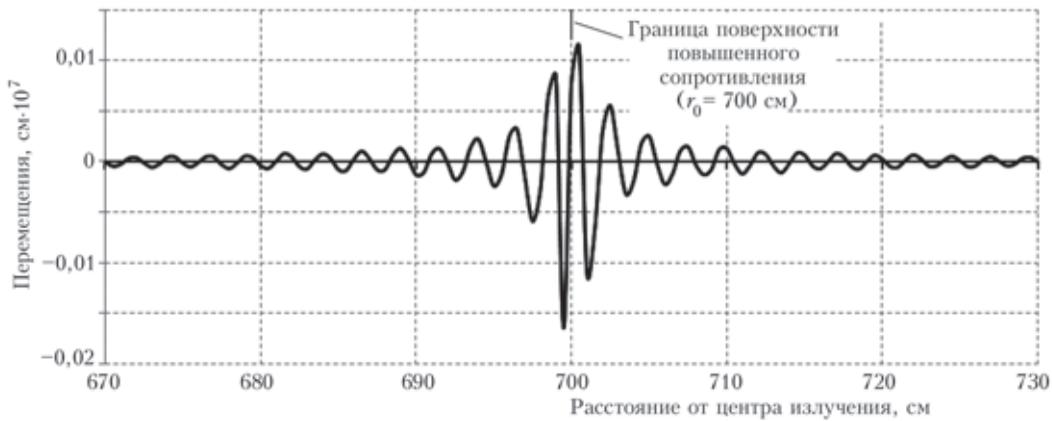


Рис. 3. Суммарные от действия напряжений  $\sigma_r$  и  $\sigma_\theta$  перемещения  $w$  в направлении, перпендикулярном плоскости пластины толщиной 1 см (исходные данные:  $a = 8000$  см;  $C_1 t = 700$  см;  $V_0 C_1 = 1 \cdot 10^{-7}$ , см<sup>4</sup>/с;  $1 \leq a_n \leq 10$  см<sup>-1</sup>, шаг 0,0001;  $b = \beta C_1 = 0,02$ )

двигается бесконечное количество элементарных волн, которые образуют мгновенные пакеты, суммарная скорость которых различна в каждый момент времени и не совпадает с рассматриваемым плоским вариантом. В то же время опыт работы с плоскими волнами показал, что результаты таких расчетов могут быть использованы на практике для оценки некоторых критериальных параметров образования и распространения АЭ волн.

Для выполнения расчетных работ, как и ранее, разработали специальную программу, позволяющую проводить аналитические исследования распространения цилиндрических волн в пластинах при любых значениях параметров, характеризующих форму и величины перемещений распространяющейся волны. Изменяемые в расчетах параметры показаны в полях исходных данных рабочего окна программы (рис.4). Выше в окне представлена формула, по которой проводится расчет выбранного в данный момент номера используемого варианта. Расчетные значения перемещений, полученные с помощью формулы (6), приведены на рис. 5, а-в. Как видно из графиков распределение

перемещений при продвижении АЭ волны по пластине в сильной мере зависит от величины коэффициента сопротивления  $b = \beta C_1$  кольца вокруг источника излучения. На рис. 5, а представлен график перемещающейся АЭ волны при  $b = 0,002$ . Видно, что влияние сопротивления кольца величиной  $b = 0,002$  незначительно влияет на форму и величины перемещений. Наблюдается максимальное значение амплитуды сигнала при значении  $C_1 t = 700$  см. По мере увеличения величины сопротивления кольца появляются отраженные от него волны, число которых увеличивается с увеличением этого сопротивления. В то же время уменьшаются амплитуды сигналов, связанные с рассеянием энергии волны по мере увеличения числа отраженных волн.

Таким образом, можно сделать вывод, что тонкое кольцо, имеющее более высокое сопротивление, чем основной материал пластины, отражает акустический сигнал и тем больше, чем выше это сопротивление.

Интересно отметить, что за границей цилиндра с незначительным повышенным акустическим сопротивлением, препятствующим распространению волн, их импульсы практически не изменяют свою форму (рис. 6, а) и идентичны тем, которые находятся в пределах кольца (на рис. 5, а). Картина резко меняется, если сопротивление среды становится большим, например  $b=10$ , как показано на рис. 5, в. В этих случаях акустическая волна теряет свою первоначальную форму, приобретает вид хаотического распределения перемещений по радиусу пластины. Еще более наглядно это изменение представлено на рис. 6, б при  $b = 100$ . В этом случае картина становится еще более сложной.

При наличии постоянного по всему объему пластины внутреннего сопротивления, определяемого коэффициентом  $\beta$ , дифференциальное уравнение и формула для расчета перемещений  $w$  примут вид:

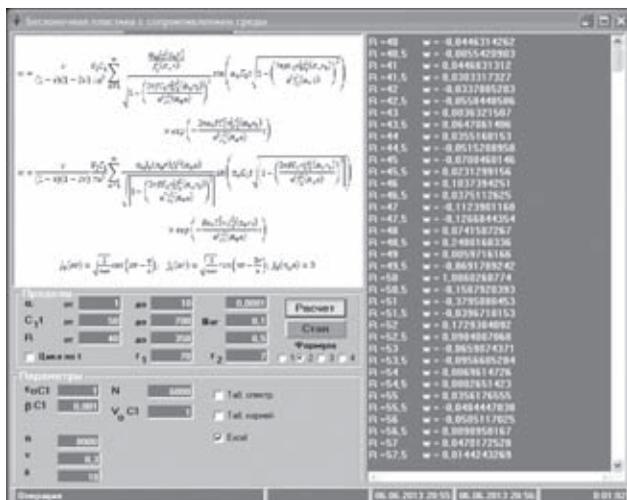


Рис. 4. Окно программы для расчета перемещений в пластине с дефектами на круге радиуса  $r_0$



$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} - \frac{1}{C_1^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - a\beta \frac{\partial \varphi}{\partial t} = -\frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{V_0}{\delta} \frac{\delta(r)\delta(t)}{2\pi r},$$

$$u = -\frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{V_0^* C_1}{2\pi\delta} \int_0^{a_2} a J_1(ar) \exp\left(-\frac{a\beta C_1^2}{2} t\right) \frac{\text{sh}(aC_1 kt)}{k} da,$$

$$u = -\frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{V_0^* C_1}{2\pi\delta} \int_0^{a_2} a J_1(ar) \times$$

при  $k < 0$ ,

$$\text{где } k = \sqrt{1 - \left(\frac{\beta C_1}{2}\right)^2}. \quad (7)$$

$$\times \exp\left(-\frac{a\beta C_1^2}{2} t\right) \frac{\sin(aC_1 kt)}{k} da, \quad k > 0,$$

Следует также иметь в виду, что съем информации осуществляется датчиками, установленными на контролируемой пластине. Амплитуд-

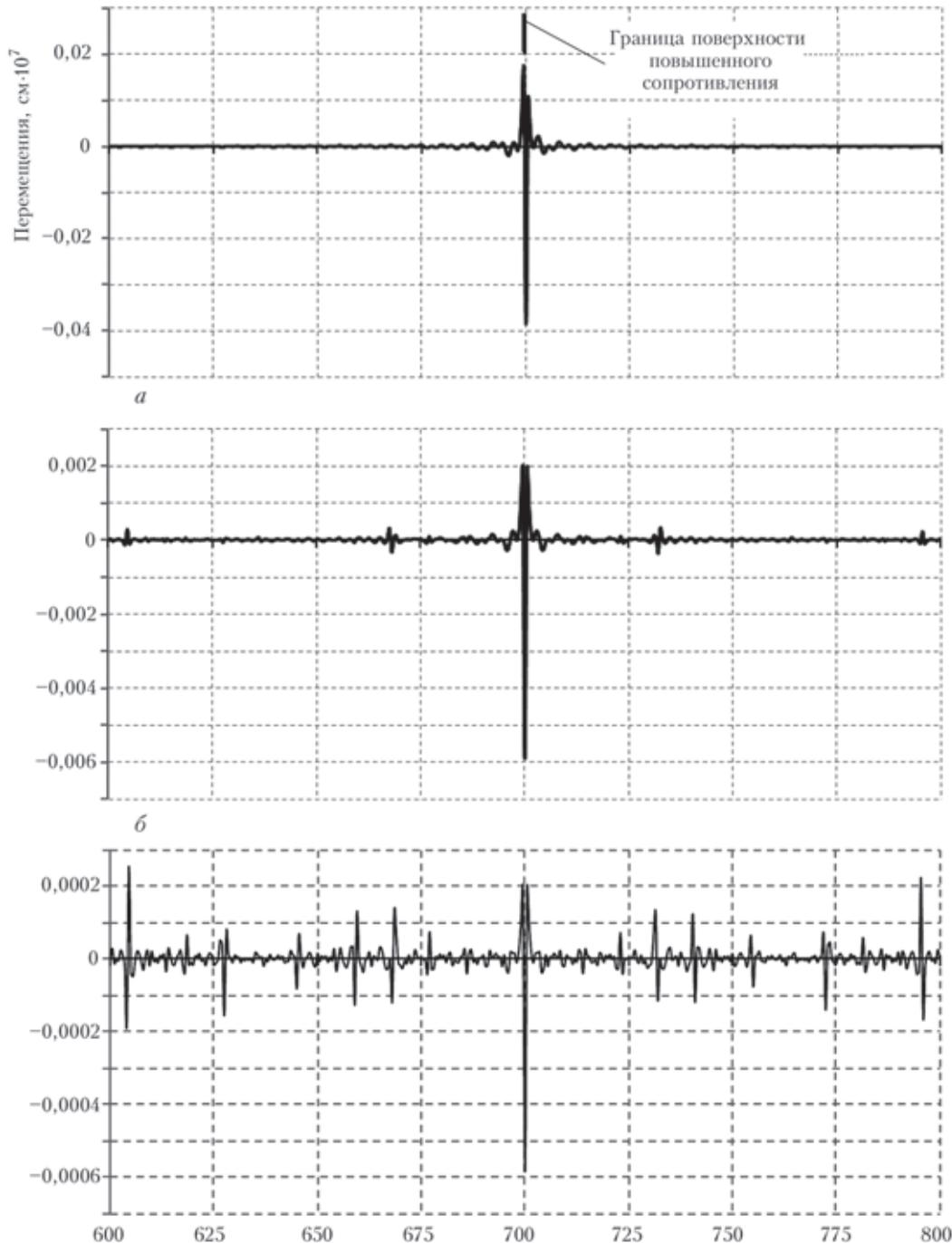


Рис. 5. Распространение АЭ волн в пластине толщиной 1 см в направлении радиуса  $u$  в зависимости от сопротивления кольца, расположенного на расстоянии 700 см от центра излучения при различных значениях  $b$ :  $a - 0,002$ ;  $b - 0,1$ ;  $v - 10$  (исходные данные см. рис. 3)

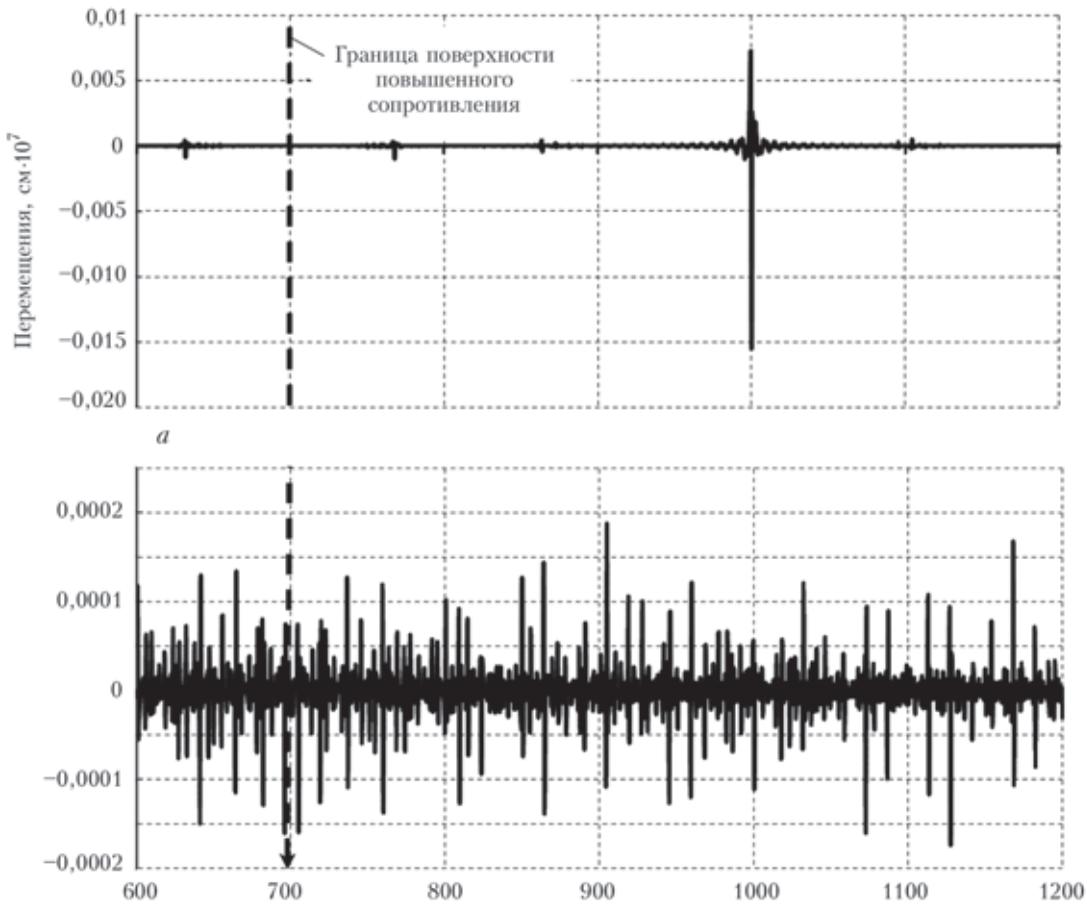


Рис. 6. Распространение акустической волны  $u$  в пластине толщиной 1 см с пиком амплитуды за пределами кольца с повышенным сопротивлением, расположенным на расстоянии 700 см от центра излучения при различных значениях  $b$ :  $a - 0,002$ ;  $b - 100$  (исходные данные расчета:  $a = 8000$  см;  $C_1 t = 1200$  см;  $V_0 C_1 = 1 \cdot 10^{-7}$  см<sup>4</sup>/с;  $1 \leq \alpha_n \leq 10$  см<sup>-1</sup>, шаг 0,0001)

но-частотные характеристики АЭ датчика в этом случае играют важную роль и, по существу, определяют параметры АЭ волн, поступающей далее на обработку в ЭВМ. Поэтому для определения параметров АЭ волн, поступающие на обработку, необходимо знать характеристики датчиков и интегрирование по формуле осуществлять с учетом этих характеристик в пределах их работоспособности, определяемых волновыми числами  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ .

Если принять во внимание, что [9]:

$$J_1(ar) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} \sin \theta \sin(ar \sin \theta) d\theta,$$

то в случае бесконечного промежутка интегрирования значения перемещений  $u$  могут быть рассчитаны по следующей формуле:

$$u = -\frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{V_0^* C_1}{\pi^2 \delta} \int_0^{\pi/2} \sin \theta \frac{\left[ \left( \frac{\beta C_1^2 t}{2} \right) - (C_1 t k + r \sin \theta)^2 \right]}{\left[ (C_1 t k + r \sin \theta)^2 + \left( \frac{C_1^2 \beta t}{2} \right)^2 \right]^2} d\theta$$

$$\frac{\left( \frac{\beta C_1^2 t}{2} \right)^2 - (C_1 t k + r \sin \theta)^2}{\left[ (C_1 t k + r \sin \theta)^2 + \left( \frac{C_1^2 \beta t}{2} \right)^2 \right]^2} d\theta \text{ при } k > 0.$$

### Выводы

1. Выполненные расчеты объемной и плоской задачи по распространению АЭ волн в пластинах показали, что независимо от способа расчета значения перемещений  $w$  резко уменьшаются примерно через  $\pm 15$  см по обе стороны максимального значения импульса, а сами перемещения незначительно отличаются по амплитуде и сдвинуты по отношению друг к другу.

2. С учетом п.1 математическая модель распространения упругих волн в пластинах с небольшими погрешностями, но с достаточной практической достоверностью может быть построена в плоском варианте при действии мгновенного линейного источника возмущения.

3. На основе проделанных работ и с учетом п.п.1 и 2 создана программа аналитического исследования этих процессов. Программа позво-



ляет в широком диапазоне исходных параметров исследовать характер и амплитуды волн, распространяющихся в пластине с дефектами, приведенными к цилиндрической поверхности, удаленной от источника на расстояние  $r_0$ .

4. Расчеты, выполненные с использованием разработанной модели, показали, что наличие дефектов структуры материалов, выражающиеся в увеличении акустического сопротивления областей, содержащих эти дефекты, приводит к появлению отраженных волн, распространяющихся симметрично в обе стороны от цилиндрической поверхности с дефектами, поверхность становится источником излучения.

5. Число отраженных волн и их амплитуда зависят от величины коэффициента сопротивления области с дефектами. При этом отраженных волн становится больше, а их амплитуда меньше с увеличением сопротивления.

6. Значения амплитуд акустических волн за пределами области повышенного сопротивления существенно зависят от величины этого сопротивления, выраженного коэффициентом  $b$ .

1. Недосека А. Я., Недосека С. А. Влияние локального скопления дефектов на распространение волн акустической эмиссии. Сообщение 1 // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2013. – № 2. – С. 3–8.
2. Недосека А. Я., Недосека С. А., Бойчук О. И. Влияние локального скопления дефектов на распространение волн акустической эмиссии. Сообщение 2 // Там же. – 2013. – № 2. – С. 9–14.
3. Механіка руйнування і міцність матеріалів / Під заг. ред. В. В. Панасюка. Довід. посіб. Т.5. Неруйнівний контроль і технічна діагностика / Під ред. З. Т. Назарчука. – Львів: ФМІ, 2001. – 1132 с.
4. Недосека А. Я., Недосека С. А., Волошкевич И. Г. О движении волн акустической эмиссии с большими скоростями // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2013. – № 1. – С. 3–9.
5. Деч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и Z преобразования. – М.: Наука, 1971. – 288 с.
6. Акустическая эмиссия и ресурс конструкций / Б. Е. Патон, Л. М. Лобанов, А. Я. Недосека и др. – Киев: Индпром, 2012. – 312 с.
7. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / Под ред. Б. Е. Патона. – Киев: Индпром, 2008. – 815 с.
8. Трантер К. Дж. Интегральные преобразования в математической физике. – М.: Гостехиздат, 1956. – 204 с.
9. Тимошенко С. П. Колебания в инженерном деле. – М.: Наука, 1967. – 444 с.

Processes of acoustic wave distortion, caused by presence of plate defects are considered. The problem is solved for planar case when a single cylindrical wave is moved in the plate with velocity  $C_1$ . It is shown that this variant could be acceptable for distance of around 5 cm and more from the place of wave excitation source application. A special computer program was developed allowing performance of analytic studies of cylindrical wave propagation in the plates at any values of parameters, characterizing form and values of movement of the propagating wave. The results of carried out calculations can be used on practice for evaluation of some criterial parameters of the AE wave formation and propagation. It is shown, in particular, that density and dimensions of area with defects prevent propagation of the acoustic waves as a result of what the waves reflected from the defect area appear. Form of the waves, overpassed an acoustic barrier, changes significantly with increase of resistance coefficient. The calculations, performed using the developed model, showed that the presence of material structure defects, expressed by increase of acoustic resistance in the areas containing these defects, result in appearance of the reflected waves, symmetrically propagating in both sides from cylindrical surface with the defects and the surface itself transforms in emission source. Ref. 9, Figures 6.

*Keywords:* Acoustic emission (AE), AE scanning, deformation waves, mathematic modeling of physical processes.

Поступила в редакцию  
04.09.2013

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

Украина, Крым, Большая Ялта,  
 Дом творчества ученых «Кацивели» НАНУ, 22-26 сентября 2014 г.



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

Конференция посвящена памяти  
 академика НАНУ В.И. Махненко

Основные даты

Подача заявок на участие и тезисов докладов до 03.06.2014 г. Рассылка второго информационного сообщения до 17.06.2014 г. Рассылка приглашений на конференцию и подтверждение участия до 15.07.2014 г. Оплата организационного взноса производится на основании счетов Оргкомитета или непосредственно во время проведения конференции.

**Оргкомитет**  
 Украина, 03680, г. Киев, ул. Боженко, 11  
 Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины  
 Тел./факс: (38044) 200-82-77  
 E-mail: journal@paton.kiev.ua, romanova@paton.kiev.ua  
 www.patonpublishinghouse.com



# АНАЛИЗ СИГНАЛОВ АНАКСИАЛЬНЫХ ВИХРЕТОКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ЭЛЕКТРОПРОВОДНЫМ НЕМАГНИТНЫМ ПОЛУПРОСТРАНСТВОМ

**В.Н. УЧАНИН**

Физ.-мех. ин-т им. Г. В. Карпенко НАН Украины. 79060, г. Львов, ул. Наукова, 5.  
E-mail: uchandin@ipm.lviv.ua

Исследуются вихретоковые преобразователи анаксиального типа с разнесенными обмотками при взаимодействии с немагнитным электропроводным полупространством. Вносимый немагнитным полупространством импеданс вихретокового преобразователя анаксиального типа рассчитан методом объемных интегральных уравнений с помощью специализированной программы VIC-3D. Построены годографы внесенного импеданса вследствие изменений удельной электрической проводимости в диапазоне от 1,0 до 56,0 МСм/м на рабочих частотах 10, 100 кГц и 1 МГц для классического коаксиального вихретокового преобразователя и анаксиальных преобразователей с различными расстояниями между обмотками. Для отдельных значений удельной электропроводности построены годографы вносимого импеданса при изменении зазора между вихретоковым преобразователем и поверхностью электропроводящего полупространства. Проведено сравнение вихретоковых преобразователей анаксиального типа с классическими коаксиальными преобразователями. Показаны характерные особенности годографов анаксиальных вихретоковых преобразователей при изменении удельной электрической проводимости и зазора. Библиогр. 18, табл. 1, рис. 7.

*Ключевые слова:* анаксиальный вихретоковый преобразователь, немагнитное электропроводное полупространство, метод интегральных уравнений, годограф, удельная электропроводность

Предложенная ранее классификация вихретоковых преобразователей (ВТП) трансформаторного типа позволяет в зависимости от взаимного размещения обмоток разделить их на коаксиальные и анаксиальные [1]. Продолжительное время в вихретоковом контроле применяли преимущественно ВТП с коаксиальным размещением обмоток [2–6]. В то же время все большее внимание исследователей и разработчиков средств вихретокового контроля вызывают ВТП анаксиального типа, в которых измерительные обмотки размещены за пределами обмотки возбуждения [7–14].

Такие ВТП имеют самостоятельное значение при решении задач толщинометрии и дефектоскопии, а также, во многих случаях, применяются в многоэлементных вихретоковых преобразователях (array eddy current probe). Анаксиальный ВТП с двумя разнесенными обмотками является образующим элементом в построении мультидифференциальных ВТП (или ВТП двойного дифференцирования), которые нашли широкое применение в решении многих актуальных задач неразрушающего контроля [13–15].

В настоящей работе исследуются характерные особенности сигналов анаксиальных ВТП при взаимодействии с немагнитным электропроводным полупространством.

**Методика проведения исследований.** Рассмотрим анаксиальный ВТП в виде двух разнесенных на расстояние  $l_p$  одинаковых обмоток 1 и 2 (рис. 1, а), который взаимодействует с электропроводным немагнитным полупространством ( $z < 0$ ) без дефекта. Обмотка 1 является обмоткой возбуждения, а ось второй измерительной обмотки 2 отнесена от оси обмотки 1 на расстояние  $l_p$ . Расчет сигналов ВТП проведено методом объемных интегральных уравнений при помощи программы VIC-3D [16, 17]. Рассчитано внесенные немагнитным полупространством изменения модуля  $Z$  и составляющих  $R$ ,  $X$  передаточного импеданса ВТП. Расчет проведено для тонкостенных обмоток высотой  $l_0 = 0,5$  мм с внешним и внутренним диаметрами 1,0 и 0,8 мм соответственно. Обмотки состоят из 20 витков провода диаметром 0,5 мм, намотанных в два слоя. Исследовали анаксиальные ВТП с обмотками, разнесенными на расстояние 1,0, 1,5 и 2,0 мм.

Для обобщения полученные результаты пронормировано относительно модуля импеданса ВТП  $Z_0$  при размещении его в свободном пространстве (в «воздухе»):  $Z' = Z/Z_0$ ,  $R' = R/Z_0$ ,  $X = X/X_0$ . Геометрические параметры (высота  $l_0$  и толщина обмотки  $\Delta r$ , расстояние между осями обмоток  $l_p$ , зазор  $t_3$ ) пронормировано к внешнему диаметру обмотки ВТП:  $l'_0 = l_0 / D_3$ ;  $\Delta r' = \Delta r / D_3$ ;  $l'_p = l_p / D_3$  и

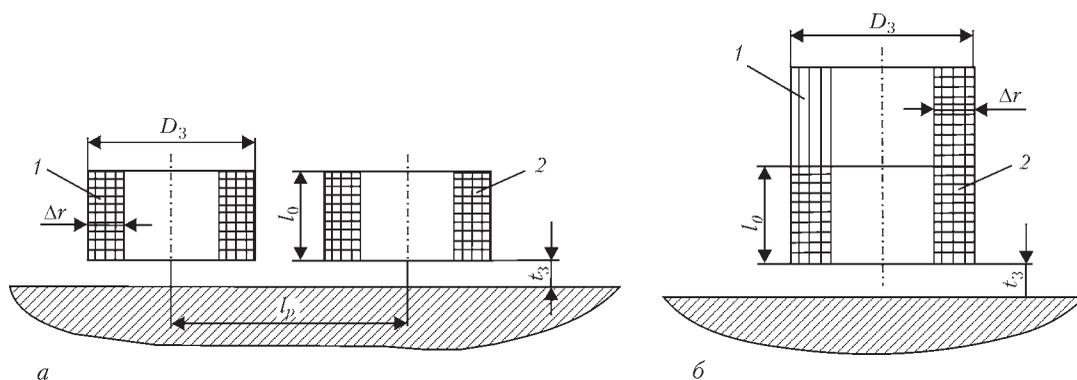


Рис. 1. Параметры и размещение обмоток исследуемых анаксиального (а) и коаксиального (б) ВТП (обозначения см. в тексте)

$t'_3 = t_3 / D_3$ . Пронормированные значения приведенной толщины и высоты обмоток ВТП равняются  $\Delta r' = 0,1$  и  $l'_0 = 0,5$  соответственно. Расчет проведено на трёх рабочих частотах: 10 кГц, 100 кГц и 1,0 МГц. Удельная электропроводность (УЭП) полупространства  $\sigma$  при расчетах изменялась от 1,0 до 56,0 МСм/м, что соответствует диапазону УЭП основных конструкционных немагнитных материалов. Расчет точек годографов влияния УЭП  $\sigma$  проведено при нулевом зазоре между ВТП и поверхностью полупространства. Кроме того, для отдельных значений УЭП  $\sigma$  рассчитаны изменения составляющих передаточного импеданса ВТП при увеличении зазора  $t_3$ .

Для сравнения рассчитывали сигналы коаксиального ВТП с такими же обмотками. При этом обмотки возбуждения ВТП размещались соосно непосредственно над измерительной обмоткой (рис. 1, б).

**Результаты и их обсуждение.** Как отмечалось, рассчитанные сигналы пронормировано относительно модуля импеданса ВТП  $Z_0$  при размещении его в свободном пространстве, который для каждого из исследуемых ВТП разный. Для безразмерной оценки используем коэффициент разнесения  $K_p$ , который определим как отношение модуля передаточного импеданса исследуемых анаксиальных ВТП к модулю передаточного импеданса коаксиального ВТП, который имеет максимальное значение. Параметры исследуемых ВТП при размещении в свободном пространстве и значение коэффициента  $K_p$  представлено в таблице. Зависимость коэффициента разнесения  $K_p$  от расстояния  $l'_0$  между обмотками показано на рис. 2. Учтем, что в теории вихретокового контроля активная составляющая импеданса ВТП при размещении в свободном пространстве условно считается равной нулю ( $R_0 = 0$ ).

Необходимо отметить одну очень важную особенность анаксиальных ВТП: реактивная составляющая  $X_0$  передаточного импеданса анаксиальных ВТП является отрицательной в отличие от коаксиального ВТП, составляющая  $X_0$  которого является положительной (см. таблицу). Последнее объясняет анализ схемы взаимодействия первичного электромагнитного поля обмотки возбуждения с измерительной обмоткой для коаксиального и анаксиального ВТП (рис. 3), из которого видно, что направления первичного электромагнитного поля в измерительных обмотках этих ВТП являются противоположными.

Результаты расчетов изменений сигналов коак-

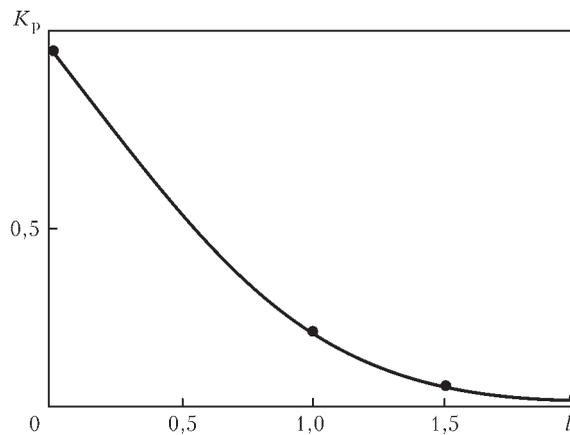


Рис. 2. Зависимость коэффициента разнесения  $K_p$  от расстояния  $l'_p$  между обмотками

**Параметры исследуемых ВТП**

Параметр, Ом	Рабочая частота	Коаксиальный ВТП	Анаксиальные ВТП		
			$l'_p = 1$	$l'_p = 1,5$	$l'_p = 2$
$Z_0$	10,0 кГц	0,0063	0,00133	0,000343	0,000137
$X_0$	10,0 кГц	0,0063	-0,00133	-0,000343	-0,000137
$Z_0$	100,0 кГц	0,063	0,0133	0,00343	0,00137
$X_0$	100,0 кГц	0,063	-0,0133	-0,00343	-0,00137
$Z_0$	1,0 МГц	0,63	0,133	0,0343	0,0137
$X_0$	1,0 МГц	0,63	-0,133	-0,0343	-0,0137
$K_p$					
-	-	1	0,21	0,054	0,022

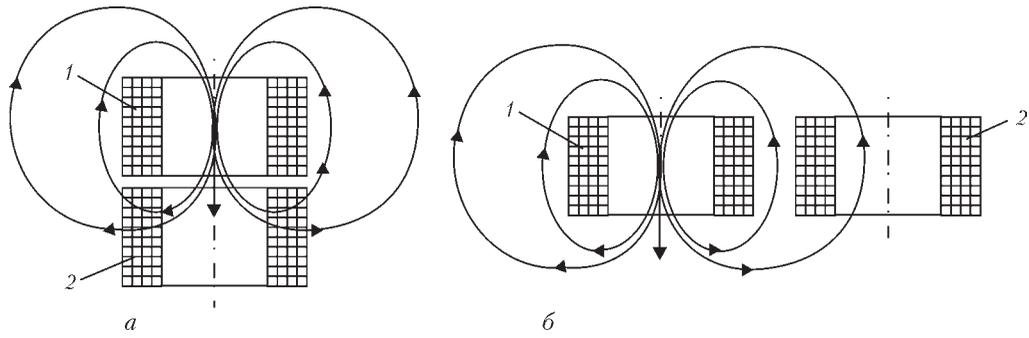


Рис. 3. Взаимодействие измерительных обмоток с электромагнитным полем обмотки возбуждения для коаксиального (а) и анаксиального (б) ВТП

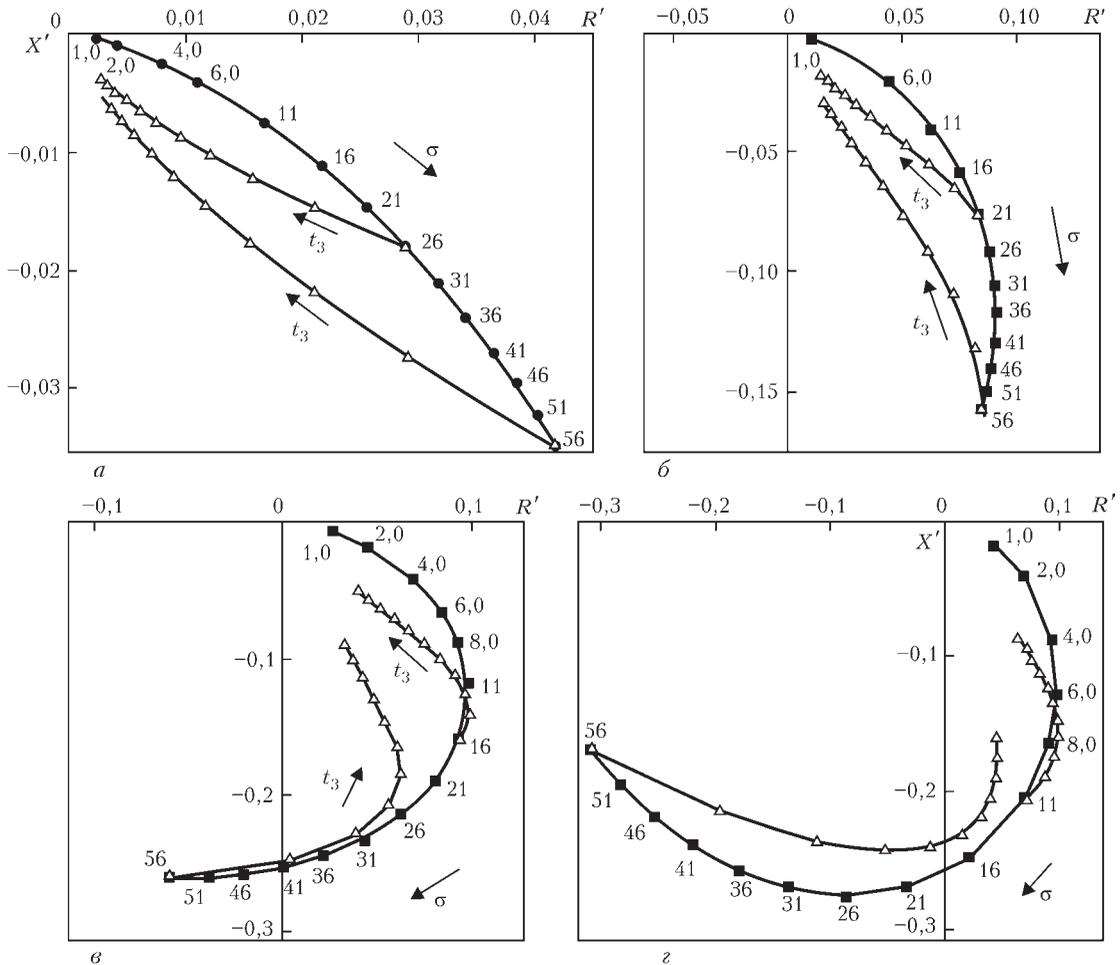


Рис. 4. Годографы внесенного импеданса вследствие изменений УЭП и зазора на рабочей частоте 10 кГц для коаксиального ВТП (а) и анаксиальных ВТП с приведенными расстояниями между обмотками  $l' = 1$  (б);  $l' = 1,5$  (в) и  $l' = 2$  (г)

сиальных и анаксиальных ВТП с разным расстоянием между обмотками при установке их на электропроводное немагнитное полупространство с разной УЭП на разных рабочих частотах представлено в виде годографов на рис. 4–6. Кроме того, для отдельных значений УЭП представлено годографы изменений сигналов исследуемых ВТП при увеличении зазора  $t_3$ .

Приведенные результаты показывают, что годографы анаксиальных ВТП от изменения УЭП существенно отличаются от соответствующих годографов коаксиальных ВТП. Годографы классических коаксиальных ВТП всегда лежат в четвер-

том квадранте комплексной плоскости (рис. 4, а, 5, а и 6, а). С повышением рабочей частоты годограф перемещается по часовой стрелке, но не выходит за пределы четвертого квадранта. Несколько похоже выглядит годограф анаксиального ВТП с наименьшим расстоянием ( $l' = 1$ ) между обмотками на низкой рабочей частоте 10 кГц (рис. 4, б). С повышением рабочей частоты и расстояния между обмотками годографы перемещаются по часовой стрелке и переходят в третий, а затем и в четвертый квадрант. Так, на рабочей частоте 10 кГц годографы переходят в третий квадрант уже для  $l' = 1,5$  (рис. 4, в) и  $l' = 2$  (рис. 4, г).

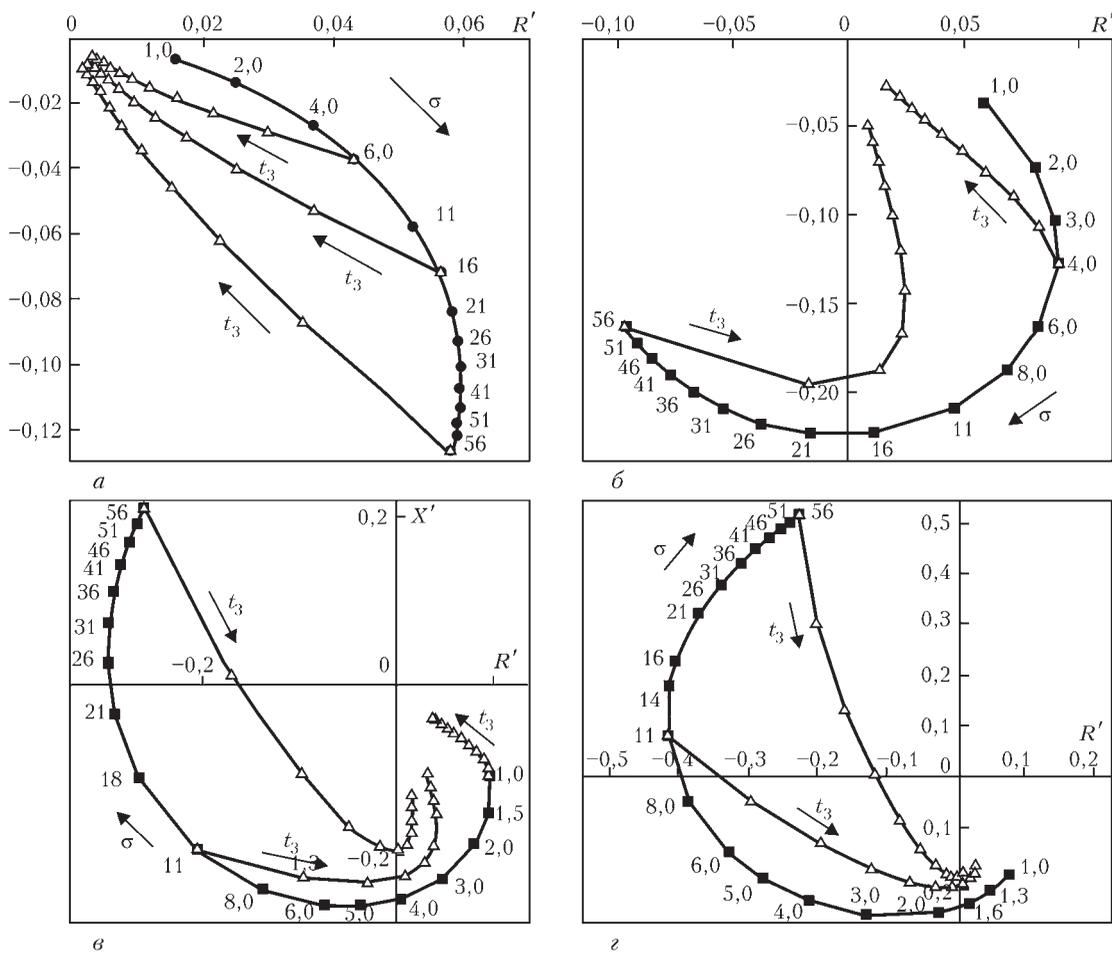


Рис. 5. Годографы внесенного импеданса вследствие изменений УЭП и зазора на рабочей частоте 100 кГц для коаксиального ВТП (а) и анаксиальных ВТП с приведенными расстояниями между обмотками  $l' = 1$  (б);  $l' = 1,5$  (в) и  $l' = 2$  (г)

На рабочей частоте 100 кГц годографы переходят в третий квадрант уже для  $l' = 1$  (рис. 5, б), а для  $l' = 1,5$  (рис. 5, в) и  $l' = 2$  (рис. 5, г) переходят во второй квадрант. На рабочей частоте 1 МГц годографы переходят во второй квадрант уже для ВТП с меньшим расстоянием между обмотками  $l' = 1$  (рис. 6, б) и  $l' = 1,5$  (рис. 6, в), а для  $l' = 2$  (рис. 6, г) годограф полностью расположен во втором квадранте. При этом значение УЭП, при котором годограф сначала пересекает ось реактивной составляющей импеданса, а затем и ось активной составляющей импеданса, является тем меньше, чем меньше расстояние между обмотками и рабочая частота. С повышением рабочей частоты и УЭП точки годографа анаксиального ВТП сближаются, так как это имеет место для известных годографов классических коаксиальных ВТП [2–6]. Отметим также, что изменения фазового угла сигнала при изменениях УЭП для анаксиальных ВТП больше, чем в коаксиальных.

Переход годографов анаксиальных ВТП в третий и четвертый квадранты комплексной плоскости отмечался в работе [12], где аналитически исследовались сигналы ВТП в виде разнесенных на разное расстояние витков. Известно, что годографы переходят в третий и четвертый квадранты

в векторно-разностных коаксиальных ВТП, которые исследовались в работе [3]. Можно говорить об определенной родственности векторно-разностных ВТП с анаксиальными. Напомним, что векторно-разностным называют ВТП, который состоит из одной обмотки возбуждения и двух измерительных обмоток, включенных встречно. При этом радиусы обеих измерительных обмоток являются большими радиуса обмотки возбуждения. Фактически сигнал векторно-разностного ВТП определяется потоком результирующего электромагнитного поля, проходящего через внешнюю относительно обмотки возбуждения кольцевую зону между витками измерительных обмоток. Сигнал анаксиального ВТП также определяется потоком результирующего электромагнитного поля, взаимодействующего с внешней относительно обмотки возбуждения измерительной обмоткой, который можно рассматривать как часть электромагнитного поля, проходящего между измерительными обмотками в векторно-разностном ВТП.

Специфические особенности имеют и годографы изменения сигналов анаксиальных ВТП при увеличении зазора. Только для наименьшего расстояния между обмотками ( $l' = 1$ ) и рабочей частоты 10 кГц линии зазора несколько подобны

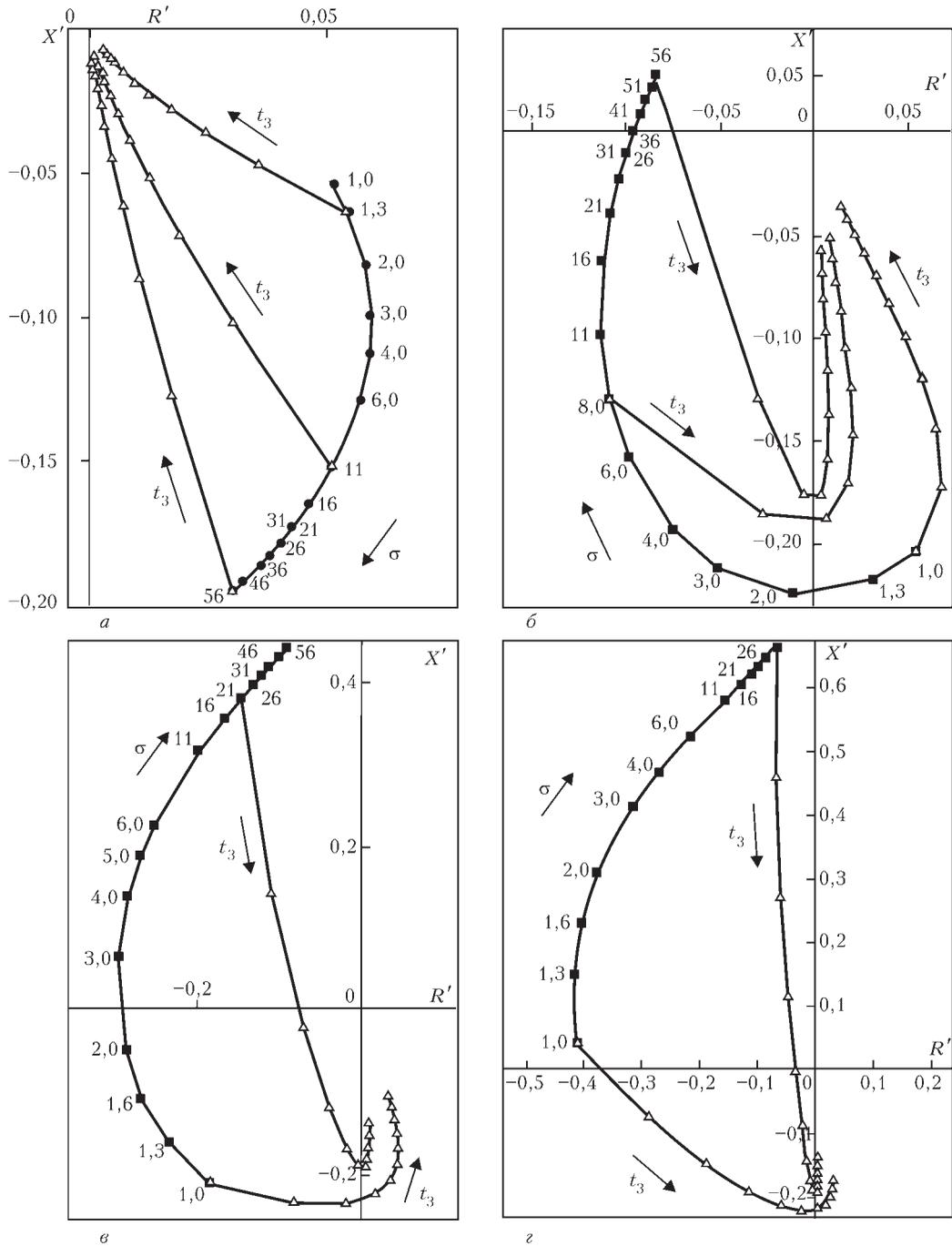


Рис. 6. Годографы внесенного импеданса вследствие изменений УЭП и зазора на рабочей частоте 1,0 МГц для коаксиального ВТП (а) и анаксиальных ВТП с приведенными расстояниями между обмотками  $l' = 1$  (б);  $l' = 1,5$  (в) и  $l' = 2$  (г)

линиям зазора коаксиальных ВТП. Единственное отличие заключается в разной кривизне линий зазора: у классического ВТП линии зазора выпуклые в сторону оси реактивной составляющей  $X'$ , а у анаксиального ВТП линии зазора выпуклые в сторону оси активной составляющей  $R'$ . На низких рабочих частотах для больших значений УЭП линии зазора сначала проходят параллельно или близко к линиям изменения УЭП, а затем поворачиваются в направлении начала координат, что соответствует размещению ВТП в свободном пространстве. Характерными в этом отношении являются годографы на рис. 4, в и 4, г. Это означает,

что раздельное измерение УЭП и зазора на основе фазового метода, который обычно применяется при использовании коаксиальных ВТП [18], в таких случаях практически невозможно. Кроме того, линии зазора для УЭП, которые при нулевом зазоре соответствуют точкам в третьем квадранте, сначала переходят в четвертый квадрант и только потом направляются в начало координат. Для точек, лежащих во втором квадранте линии зазора сначала переходят в третий квадрант, а затем через четвертый квадрант направляются в начало координат, т. е., при увеличении зазора годографы изменения сигнала при изменениях УЭП для анак-

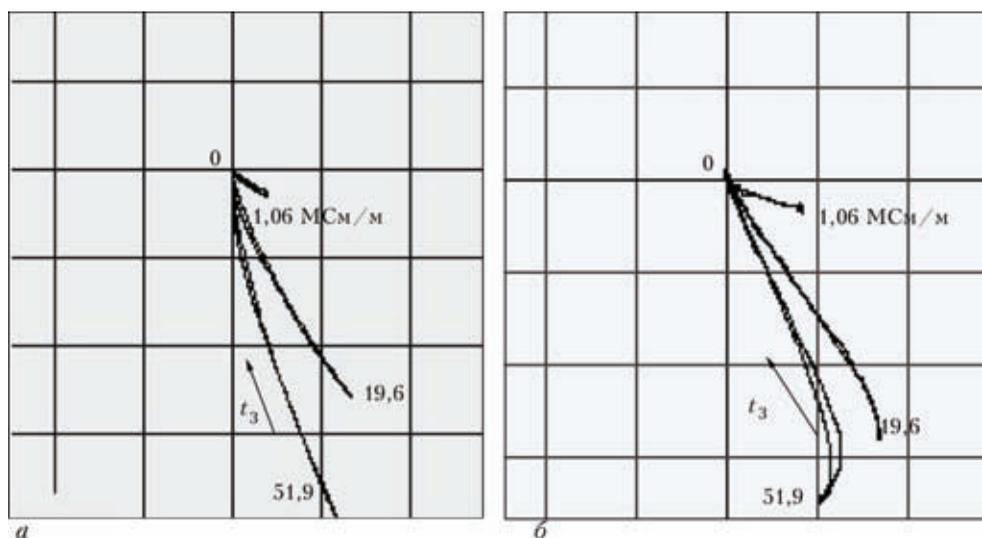


Рис. 7. Экспериментальные годографы изменения сигнала коаксиального (а) и анаксиального (б) ВТП при изменении зазора  $t_3$  на образцах с разной УЭП

сиальных ВТП испытывают более значительные изменения, чем годографы коаксиальных ВТП. В частности, они могут уже не выходить за пределы четвертого квадранта и сближаются, что также может усложнить раздельное измерение параметров объекта контроля. Это необходимо иметь в виду при изготовлении обмоток анаксиальных ВТП на диэлектрических каркасах со щечками.

Экспериментальную проверку отдельных результатов проводили на анаксиальном ВТП в виде двух расположенных рядом обмоток, состоящих из 20 витков провода диаметром 0,06 мм, установленных на ферритовых сердечниках диаметром 1,0 мм. Для сравнения использован коаксиальный ВТП, в котором обе обмотки расположены на общем ферритовом сердечнике один над другим. Необходимо отметить, что экспериментальные ВТП не совсем соответствуют ВТП, которые использованы в расчетной модели. Для обеспечения более высокой чувствительности обмотки экспериментальные ВТП размещены на ферритовых сердечниках. Кроме того, есть конструктивный зазор между обмотками и поверхностью объекта контроля, что, как указано выше, может влиять на вид годографов анаксиальных ВТП.

Экспериментальные исследования сигналов ВТП проводили на рабочей частоте 10 кГц при помощи компьютерной системы на основе вихреговой платы EDDYMAX. Регистрировали годографы сигнала ВТП при изменении зазора между ВТП и образцами из неферромагнитных сплавов с удельной электропроводностью 1,06, 19,6 и 51,9 МСм/м (рис. 7). Методика предусматривала предварительное размещение ВТП в свободном пространстве и проведение стандартной операции компенсации сигнала небаланса ВТП (операция балансировки). Подвижная точка, соответствующая сигналу ВТП в комплексной плоскости, пе-

ремещается в центр экрана дефектоскопа (точка 0 на рис. 7). После этого ВТП перемещались на поверхность образцов с различной УЭП поочередно с соблюдением их вертикальной ориентации. При этом подвижная точка перемещалась по кривым, соответствующим линиям зазора в точку, координата которой зависит от УЭП образца (рис. 7). После этого ВТП снова удалялся от поверхности образца и подвижная точка возвращалась в начало координат (точка 0). Следы подвижной точки регистрировались в памяти дефектоскопа по стандартной процедуре.

Представленные на рис. 7 результаты подтверждают особенность годографов сигналов анаксиальных ВТП при изменении зазора, в частности, разное направление выпуклости. Это видно из сравнения экспериментальных годографов на рис. 7 с расчетными годографами на рис. 4, а и 4, б. Кроме того, на рис. 7 виден характерный «прижим» линии зазора к условной линии влияния УЭП на начальных участках изменения зазора при подъеме ВТП.

### Выводы

Методом объемных интегральных уравнений проведен расчет сигналов анаксиального ВТП при размещении его с различным зазором над немагнитным полупространством с различной удельной электрической проводимостью для различных рабочих частот.

Построены годографы сигналов анаксиальных ВТП при взаимодействии с немагнитным электропроводным полупространством различной удельной электрической проводимости на различных рабочих частотах и показаны их особенности.

Проведено сравнение годографов сигналов анаксиальных ВТП с годографами сигналов традиционных ВТП коаксиального типа.



Автор благодарит проф. Герхарда Мока из Магдебургского университета за предоставленную возможность проведения расчетов во время визита.

1. *Учанин В. Н.* Вихретоковые накладные преобразователи: расширенная классификация, сравнительный анализ и характерные примеры реализации (Обзор) // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2010. – № 4. – С. 24–29.
2. *Дорофеев А. Л., Казаманов Ю. Г.* Электромагнитная дефектоскопия. – М.: Машиностроение, 1980. – 232 с.
3. *Соболев В. С., Шкарлет Ю. М.* Накладные и экранные датчики. – Новосибирск: Наука. – 1967. – 144 с.
4. *Дякин В. В., Сандовский В. А.* Теория и расчет накладных вихретоковых преобразователей. – М.: Наука, 1981. – 136 с.
5. *Libby H. L.* Introduction to Electromagnetic Nondestructive Test Methods. – New-York etc: Wiley – Interscience, 1971. – 365 p.
6. *Dood C. V., Deeds W. E.* Analytical Solution to Eddy Current Probe Coil problems // J. Appl. Phys. 1968. – 39, № 6. – P. 2829–2838.
7. *Контроль структуры и толщины металлических изделий с использованием анаксимальных преобразователей / Б.И.Блажкевич, Г.Н. Макаров, Л.Л. Либаский, Ю.М. Шумков // Физ.-хим. механика материалов. – 1974. – № 3. – С. 89–94.*
8. *Mayos M., Muller J. L.* Geometrically Anisotropic Probes: an Improved Eddy Current Technique // J. of Nondestructive Evaluation. – 1987. – 6, № 2. – P. 109–116.
9. *Marinov S. G.* Analysis of flat system with displaced sensors for eddy current NDE of ferromagnetic metals // Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. – Vol. 4A. – New York: Plenum Press. – 1984. – P. 443–451.
10. *Cecco V. S., Carter J. R., Sullivan S. P.* An Eddy Current Techneque for Detection and Sizing Surface Cracks in Carbon Steel // Materials Evaluation. – 1993. – № 5. – P. 572–577.
11. *Уменьшение чувствительности к влиянию зазора при контроле импульсным вихретоковым методом и использованием двухступенчатых дифференциальных датчиков / Ли Шу, Хуанг Сон-линь, Жао Вей, Ю Пенг // Дефектоскопия. – 2008. – № 2. – С. 84–93.*
12. *Рибачук В. Г.* Накладный вихрострумовый перетворювач анаксимального типу над провідним півпростором // Мат. 7 Нац. наук.-техн. конф. «Неруйнівний контроль і технічна діагностика». – Київ: УТНКТД, 2012. – С. 155–161.
13. *Учанин В. Н.* Вихретоковые мультидифференциальные преобразователи и их применение // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2006. – №3. – С. 34–41.
14. *Учанин В. Н.* Вихретоковый контроль сварных соединений // Там же. – 2008. – № 4. – С. 71–80.
15. *Uchanin V., Mook G., Stepinski T.* The investigation of deep penetrating high resolution EC probes for subsurface flaw detection and sizing // Proc. 8-th Europ.Conf. for NDT. – Barcelona. – 2002. – P. 312. (www.ndt.net. - Feb. 2003. – Vol. 8. – № 2).
16. *Dunbar W. S.* The Volume Integral Method of Eddy Current Modeling // J. of Nondestructive Evaluation. – 1985. – 5, № 1. – P. 9–14.
17. *User's Guide for VIC-3D: An Eddy current NDE Code. Version 2.4. – USA, Bloomington: Sabbagh Associates, Inc. – 1996. – 90 p.*
18. *Учанин В. Н., Макаров Г. Н.* Подавление влияния зазора при бесконтактном измерении удельной электрической проводимости методом вихревых токов // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 1996. – № 4. – С. 41–45.

The paper studies the eddy-current transducers of anaxial type with spaced winding at interaction with nonmagnetic conductive half-space. Impedance of the eddy-current transducer of anaxial type induced by nonmagnetic half-space was calculated by method of volume integral equations using special program VIC-3D. Hodographs of the impedance induced due to change of specific conductivity in the range from 1.0 to 56.0 MСm/m at 10.0, 100 kHz and 1.0 Hz operating frequencies for classic co-axial eddy-current transducer and anaxial transducers with different distance between the windings were built. The hodographs of induced impedance were built for separate values of specific conductivity during change of a gap between the eddy-current transducer and surface of the conductive half-space. Comparison of the eddy-current transducers of anaxial type with classic co-axial transducers was made. Typical peculiarities of the hodographs of anaxial eddy-current transducers during change of specific conductivity and gap were shown. Ref. 18, Table 1, Figures 7.

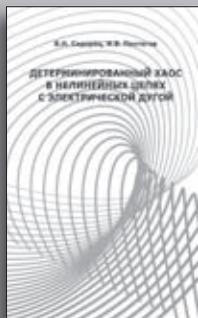
*Key words* : anaxial eddy-current transducer; nonmagnetic conductive half-space, method of integral equations, hodograph, specific conductivity

Поступила в редакцию  
12.06.2013

**НОВАЯ КНИГА**

**Сидоренко В. Н., Пентегов И. В.**

**Детерминированный хаос в нелинейных цепях с электрической дугой.** – Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2013. – 272 с.



Монография посвящена изложению результатов исследования фундаментальных свойств электрической дуги как нелинейного элемента электрических цепей. Описаны выявленные закономерности и механизмы возникновения детерминированного хаоса в этих цепях и сценарии его развития. Особое внимание уделено оригинальным математическим методам исследования нелинейных динамических систем. Все полученные результаты проиллюстрированы.

Монография рассчитана на широкий круг специалистов в областях теоретической электротехники и нелинейных динамических систем. Она может быть полезна ученым, аспирантам и студентам.

*Заказы на книгу просьба направлять в редакцию журнала «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»*

## МАЛОГАБАРИТНАЯ ЭМА ПРИСТАВКА К СЕРИЙНОМУ УЛЬТРАЗВУКОВОМУ ДЕФЕКТОСКОПУ

Г. М. СУЧКОВ, С. В. ХАЩИНА, А. В. ДЕСЯТНИЧЕНКО

Нац. техн. ун-т «ХПИ». 61002, г. Харьков, ул. Фрунзе, 21. E-mail: omsroot@kpi.kharkov.ua

Описана универсальная ЭМА приставка для стандартных УЗ дефектоскопов и толщиномеров. Прибор позволяет повысить выявляемость дефектов, увеличить производительность контроля, при этом не требуется специальная зачистка поверхности изделия. Приведены основные технические характеристики приставки и описание ее компонентов: блока управления (формирователя радиосигналов), силового усилителя (генератора зондирующих импульсов), предварительного усилителя с узкополосным фильтром, органов управления и отображения настроек. Приставка позволяет плавно регулировать основные параметры выходных сигналов: частоты в пакете возбуждения от 0,2 до 1,5 МГц, частоты следования от 40 Гц и до частоты, ограниченной подключенным дефектоскопом, количества периодов частоты заполнения в пакете от 1 до 10, выходную мощность от 0 до 100 %. Приставка имеет широкий спектр применения в комплексе с различными приборами и преобразователями практически любого типа, в том числе пьезоэлектрическими, что позволяет повысить чувствительность контроля. Показан пример применения прибора со стандартным серийным дефектоскопом при контроле волнами Рэлея цилиндрического образца на наличие поверхностных и подповерхностных дефектов. Показано, что на расстоянии до 1 м выявляются модели трещин глубиной от 0,2 мм и более. Приставка имеет малые габариты и массу, общее энергопотребление приставки составляет не более 15 Вт, что является определяющим критерием при использовании ее в полевых условиях.

*Ключевые слова:* ультразвуковой дефектоскоп, ЭМА приставка, поверхностный дефект, волна Рэлея, бесконтактный контроль, ЭМА преобразователь

Металлургия – базовая отрасль народного хозяйства Украины – обеспечивает более 25 % промышленного производства. В мировом производстве чёрной металлургии доля Украины, по данным Международного института чугуна и стали, составляет 7,4 % [1]. Металлургия снабжает конструктивным материалом основные отрасли промышленности – машиностроение, транспорт, обрабатывающую промышленность, нефтегазовую и др. При этом требования к качеству металлопродукции постоянно повышаются, объемы производства, а следовательно, и контроля растут [2]. Десятки миллионов тонн металлопродукции эксплуатируются в сложных условиях, что приводит к появлению опасных дефектов. Наличие дефектов приводит к авариям, и, соответственно, к существенным материальным потерям (рис.1). Современные УЗ дефектоскопы не в полной мере могут обеспечивать выявляемость поверхностных и подповерхностных дефектов [3] изделий с большой поверхностью: листов, труб, заготовок, слябов и т.п. Требуются затратные технологии подготовки объектов контроля (ОК) к проведению контроля [4].

Эффективно позволяют обнаруживать поверхностные дефекты вихретоковые дефектоскопы [5]. Однако они требуют значительного времени на сканирование всей поверхности изделия при проведении контроля.

Улучшить положение возможно за счет использования для контроля поверхностных волн, но при использовании контактного метода не допускается наличие жидкости на контролируемой поверхности.

В настоящее время разработаны, внедрены и эффективно эксплуатируются на ПАТ «МК «Азовсталь», ОАО Нижнетагильский металлургический комбинат», ОАО «Кузнецкий металлургический комбинат», Никопольский трубный завод установки для ЭМА контроля [6, 7]. Однако они в основном используются в автоматических средствах контроля. Указанные системы громоздки, энергозатратны. Следовательно, научно-практическая задача по разработке портативных приборов, которые дополняют имеющиеся серийные УЗ приборы, тем самым значительно расширив их возможности – возможность проведения бесконтактного УЗ контроля корродированных, горячих,



Рис. 1. Излом железнодорожной оси с внутренним дефектом



защищенных покрытием или загрязненных объектов, является актуальной и необходимой для промышленности.

При разработке ЭМА приставки использованы результаты исследований и разработки генераторов для ЭМА установок, предусилителей и ЭМА преобразователей, в том числе предназначенных для контроля волнами Рэля [8]. На базе этой разработки выполнена приставка к серийным дефектоскопам, которая может использоваться как для контроля, так и в качестве стенда для исследований параметров контроля и характеристик материалов изделий. Блок-схема разработанного устройства приведена на рис. 2. Приставка содержит блок управления, в основу которого положен современный микропроцессор. Блок управления тактируется двумя генераторами, один из которых имеет фиксированную частоту, а второй регулируемый. Это дает возможность микропроцессору формировать требуемые сигналы генерации и запуска. При этом все установленные параметры контроля и приборов визуализируются на жидкокристаллическом индикаторе (ЖКИ). Корректировка параметров работы устройства осуществляется через органы управления. Устройство имеет входы-выходы синхронизации и может работать как в режиме запуска от внешнего дефектоскопа, так и в режиме запуска от собственного синхронизатора. Блок управления формирует логические сигналы, которые поступают на вход генератора зондирующих импульсов (ГЗИ) для дальнейшего усиления. После усиления до заданного уровня импульсы возбуждения через соединительный кабель поступают на индуктор ЭМАП. Температура выходных транзисторов ГЗИ фиксируется встроенным датчиком и также отображается на экране. При достижении критической температуры прибор выводит на экран сигнал предупреждения, при дальнейшем ее росте блокирует генерацию УЗК.



Рис. 2. Блок-схема ЭМА приставки с подключенным дефектоскопом и преобразователем (ВД – встроенный датчик)

Сигналы с приемной катушки ЭМА преобразователя поступают на регулируемый узкополосный предусилитель. Приставка может снабжаться как сетевым, так и автономным блоком питания.

Непосредственно во время генерации и приема УЗК на контрольном образце можно проводить более тонкую подстройку мощности ГЗИ, количества импульсов в зондирующем пакете, частоты генерации и частоты следования зондирующих импульсов. Имея энергонезависимую память, прибор обеспечивает сохранность данных при отключении питания.

Прибор имеет широкие пределы внутренних настроек. При использовании его в режиме запуска можно устанавливать частоту зондирования в широких пределах (от 40 Гц и до частоты, ограниченной подключенным дефектоскопом), с дискретностью в 1 Гц. Это сделано с целью оптимального выбора частоты следования УЗК. При ручном «медленном» контроле низкая частота посылки пакетов импульсов значительно уменьшает энергопотребление прибора, что важно, если он используется в полевых условиях.

Устройство может быть подключено и согласовано с разными датчиками, применение которых может отличаться в зависимости от конкретного ОК и условий технического задания (ТЗ). Имеется регулировка частоты сигнала в пакете возбуждения от 0,2 до 1,5 МГц, при этом неравномерность АЧХ во всем диапазоне не превышает 1,5 дБ (рис. 3, а). Основную частоту пропускания предварительного усилителя  $f_{\text{усил.}}$  можно изменять в широких пределах от 0,2 до 1,5 МГц. На рис. 3, б приведено АЧХ при  $f_{\text{усил.}} = 0,9$  МГц.

Блок управления устанавливает количество периодов частоты заполнения в пакете, число кото-

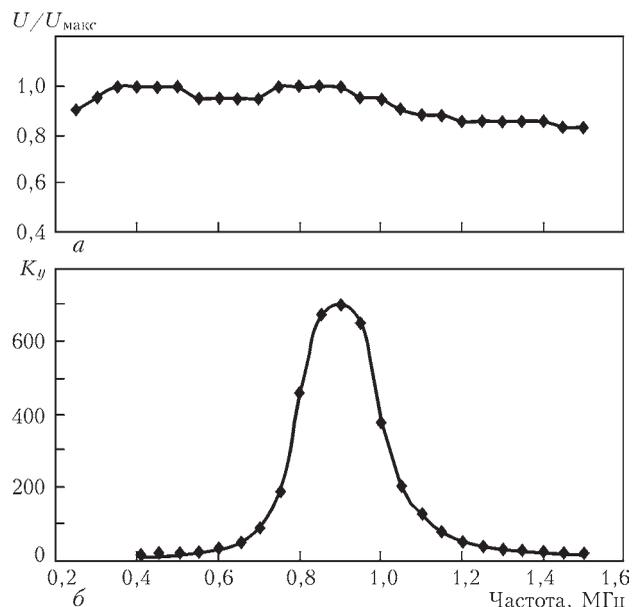


Рис. 3. АЧХ генератора в полосе частот от 0,2 до 1,5 МГц (а) и АЧХ предварительного усилителя при установленной частоте пропускания  $f_{\text{усил.}} = 0,9$  МГц (б)



Рис. 4. Дефектоскопический комплект с ЭМА приставкой – контроль трубчатого образца

рых может изменяться от 1 до 10. Это позволяет оптимально настроить акустический тракт для получения максимального сигнала с минимально возможными энергозатратами. В случаях, когда не требуется сигнал значительной мощности, его можно ослабить, воспользовавшись дискретным цифровым регулятором выходной мощности ГЗИ, и тем самым сократить потребление энергии. Установленная мощность ГЗИ (в усл. ед.) отображается на ЖКИ.

Для программирования микропроцессора приставка оснащена интерфейсом JTAG на задней панели устройства.

Приставка может использоваться практически с любым серийным УЗ дефектоскопом. Вариант такого подключения показан на рис. 4. Важно, что разработанный комплект может использоваться как с ЭМА преобразователями, так и пьезоэлектрическими.

В частности, к данной приставке был подключен ЭМАП, возбуждающий и принимающий поверхностную волну Рэлея с частотой 0,9 МГц. В

режиме работы, при частоте следования зондирующих импульсов 125 Гц, 6 импульсов в пакете и 25 кВт пиковой мощности выходного каскада общее потребление приставки составляет не более 15 Вт. При этом на расстоянии 1 м выявляются модели трещин глубиной от 0,2 мм и более.

### Выводы

Для увеличения возможностей стандартных контактных дефектоскопов при УЗ труб, листов, заготовок и аналогичных изделий разработана приставка, которая позволяет выявлять дефекты как контактным методом с повышенной чувствительностью, так и бесконтактным ЭМА способом. Прибор позволяет существенно уменьшить расходы на подготовку и проведение УЗ за счет исключения процедур зачистки поверхности ОК.

1. [http://ru.wikipedia.org/wiki/Металлургия\\_Украины](http://ru.wikipedia.org/wiki/Металлургия_Украины)
2. Входной контроль качества металла // Металлы и сплавы: Справ. / В. Г. Шипша, В. К. Афонин, Б. С. Ермаков и др. – С.-Пб: НПО «Профессионал», 2003. – С. 84–87.
3. Неразрушающий контроль: Справ.: В 8 т. / Под ред. В.В.Клюева. – М.: Машиностроение, 2003.
4. ГКД 34.17.402–96. Унифицированные методики ультразвукового контроля основного металла и сварных соединений оборудования и трубопроводов тепловых электростанций. – Киев, 1996. – 23 с.
5. Сучков Г. М., Хомяк Ю. В. Повышение возможностей вихретокового контроля поверхности непрерывно-литых слэбов из ферромагнитных сталей // Дефектоскопия. – 2013. – № 1. – С. 79–83.
6. Сучков Г. М., Алексеев Е. А., Захаренко В. В. Энерго- и ресурсосберегающие приборы и технологии неразрушающего контроля // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2006. – № 4. – С. 29–34.
7. ТУ 14-2-542–83. Рельсы объемно-закаленные Р65, проконтролированные ультразвуковым электромагнитно-акустическим методом в зоне, ограниченной толщиной шейки. – Харьков: УкрНИИМет, 1983. – 9 с.
8. Генератор зондирующих импульсов для ЭМА дефектоскопов / Г.М.Сучков, О.Н. Петрищев, И.В. Чередниченко и др. // Дефектоскопия. – 2012. – № 9. – С. 42–47.

The paper describes an all-purpose EMA-attachment for standard UT flaw detectors and thickness meters. The instrument allows increasing defect detectability, and improving testing efficiency, without requiring any special cleaning of item surface. Main technical parameters of the attachment and description of its components are given. The attachment allows smooth adjustment of the main parameters of output signals: frequency in excitation pack from 0.2 up to 1.5 MHz, repetition rate from 40 Hz and up to frequency limited by the connected flaw detector, number of filling frequency periods in the pack from 1 up to 10 and output power from 0 up to 100%. The attachment has a broad application spectrum in a set with various instruments and transducers of practically any type, also piezo electric ones. The paper gives an example of instrument application with standard batch-produced flaw detector at testing of a cylindrical sample by Raleigh waves for surface and subsurface defects. It is shown that crack models of the depth from 0.2 mm and more are detected at up to 1 m distance. The attachment has small size and weight that is the determinant criterion for its application in the field.

*Keywords*: ultrasonic flaw detector, EMA attachment, surface defect, contactless testing, EMA transducer

Поступила в редакцию  
04.04.2013

## К ВОПРОСУ СЕРТИФИКАЦИИ ПЕРСОНАЛА ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ ДЕГРАДАЦИИ МАТЕРИАЛА МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ

И. П. БЕЛОКУР, Ю. О. ГОРДОННАЯ

Нац. авиационный ун-т. 03680, Киев-58, пр-т Космонавта Комарова, 1. E-mail: ins@nau.edu.ua

Проведен сравнительный анализ требований к сертификации персонала по неразрушающему контролю по ISO 9712, ISO 17024, EN 4179, национальным требованиям к персоналу, оценивающему качество объектов по результатам контроля. Рассмотрены программы подготовки и аттестации специалистов, которые используют органы по сертификации персонала в Украине. Показано, что в этих программах не учтены задачи контроля напряженно-деформированного состояния и деградации материала металлоконструкций, которые имеют место при диагностировании опасных объектов трубопроводного транспорта, длительно находящегося в эксплуатации. Предложено в программах сертификации специалистов рассматривать методологические основы прогнозирования остаточного ресурса конструкции и оценки технического состояния экологически опасных объектов, а процессы их реализации вводить в систему управления качеством конкретного изделия в соответствии с требованиями стандарта ДСТУ ISO 9001. Библиогр. 26, рис 4.

*Ключевые слова:* техническое состояние объектов, сертификация персонала по НК, система управления качеством, остаточный ресурс

Оценка фактического технического состояния объектов трубопроводного транспорта (трубопроводов, арматуры, компрессоров, переходов и др.) особенно актуальна в условиях острой необходимости в продлении срока эксплуатации объектов, отработавших свой нормативный ресурс. Влияние коррозионно активных сред, колебание температуры, рабочих нагрузок и напряжений, термоциклические процессы, тепловые нагрузки приводят со временем к изменению свойств эксплуатируемого металла [1]. Ресурс безопасной эксплуатации металлоконструкций зависит от фактического состояния структуры и физико-механических свойств металла. В процессе длительной эксплуатации происходят деградационные изменения свойств металла, в том числе: снижение пластичности  $\sigma$ , выраженной в сближении величины предела текучести  $\sigma_T$  и предела прочности  $\sigma_B$ ; снижение трещиностойкости, что сопровождается деградацией ударной вязкости  $\delta_H$  (КСУ); деформационного старения структуры, сопровождающегося снижением характеристик пластичности, трещиностойкости и ударной вязкости [16].

Остаточный ресурс объекта контроля рассчитывается по построенной математической модели и определяется совокупностью оценок технических параметров объекта, уравнением состояния, условиями эксплуатации объекта и совокупностью предельных технических параметров [12]. Специалисты по НК определяют эти параметры и диагностируют техническое состояние конкретного объекта.

Академик В.В.Клюев обосновал структуру диагностирования технического состояния объ-

екта. Остаточный ресурс всего объекта оценивается по компоненту, находящемуся в наихудшем состоянии. Причем, оценка остаточного ресурса осуществляется после отнесения технического состояния к одному из классов: «дефект», «повреждение», «разрушение», «отказ». Деградация объекта определяется через ее признаки, кинетику и механизм развития, а диагностирование среды проводится по анализу ее свойств, создаваемых нагрузок и напряженного состояния объекта (рис. 1). При этом решается задача прогнозирования работоспособности объекта в реальном масштабе времени [16]. В этой связи очень важно проводить переход к единым международным схемам сертификации персонала, единым программам обучения и аттестации, на единые международные правила, учебники, справочники, стандарты и т.п., обеспечивая непрерывность этого процесса [24–26]. Для систем ТД и НК используют:

- единство измерений в международной системе единиц СИ;
- объективность (верность) в рамках допустимой неопределенности ТД и НК;
- признанные и действующие требования международных систем управления качеством;
- прозрачные процедуры проверки компетентности персонала.

НК обеспечивает качественную, количественную и метрологически проверяемую оценку безопасности металлоконструкций при оценке степени усталости металла и многообразия процессов его деградации [5, 8]. Такой контроль качества является действенным, когда процесс контроля

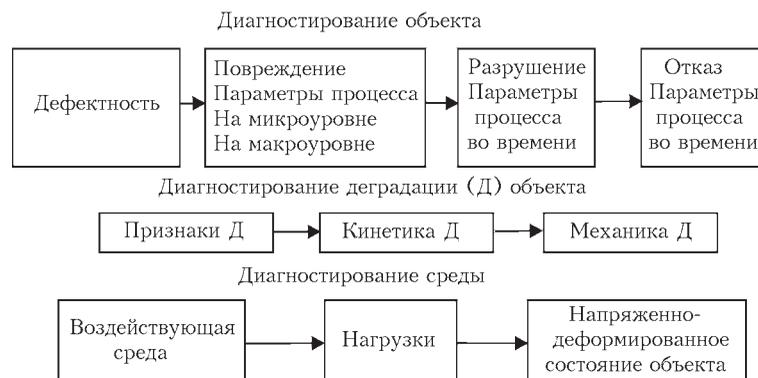


Рис. 1. Структура диагностирования технического состояния

введен в систему управления качеством (СУК) конкретной продукции (изделия, конструкции, объекта), начиная с ее разработки, изготовления, монтажа, эксплуатации, ремонта и до конца срока использования. Требования к разработке СУК изложены в международном стандарте ISO 9001. В частности, эти требования относятся и к методам НК качества [24, 26].

При проведении контроля с помощью основных методов и средств НК металлоконструкций персонал всех уровней квалификации привычно констатирует «есть дефект» или «нет дефекта» в какой-то области исследуемого объекта и, как правило, вне логической связи с его рабочей предысторией и без прослеживания влияния этой дефектности на работоспособность целостной конструкции (изделия) в данное время и в будущем понимание возможной неработоспособности условно бездефектного металла реально не присутствует в практической подготовке и аттестации даже концептуально [13].

Эффективный когда-то дефектоскопический акцент подготовки и аттестации персонала НК, главенствующий в практической диагностике и контроле металлов, сегодня, по-видимому, исчерпал свои возможности и не может обеспечивать объективную подготовку компетентного персонала и его сертификацию. В связи с этим необходима гармонизация систем подготовки и сертификации, так как они отличаются в различных производственных секторах. Озабоченность тем, что уровень подготовки и правила сертификации специалистов по НК различаются не только в разных странах, но и в разных секторах промышленности одной страны, была высказана на 18-й Всемирной конференции по НК в городе Дурбане (ЮАР) [15]. Персонал, выполняющий НК, должен показать, где и примерно когда (по усредненной скорости роста уже накопленной необратимой деградации металла) следует ожидать перехода в состояние начала усталостного разрушения. Особенно это касается общей накопленной усталости металла всего трубопровода с указанием локальных зон концентрации факторов деградации с ко-

личественным измерением в общем и в каждой из локальных зон.

Стандарты ISO 17024, EN ISO 9712, EN 4179 определяют требования к органам и процессам сертификации персонала, который выполняет НК промышленной продукции, а также устанавливают требования к органам по сертификации, к учебным и экзаменационным центрам. Общая модель комплексной оценки квалификации персонала базируется на применении процессного подхода к оценке квалификационного уровня по различным видам и методам НК. Особое место занимает подготовка и аттестация персонала, который выполняет контроль напряженно-деформированного состояния (НДС) и определяет эксплуатационную деградацию материала трубопровода и арматуры. Эксплуатационная деградация заключается в изменении физико-механических свойств: металла конструкции, пластичности, адгезионной прочности, износостойкости материала, коэффициента трения, поврежденности в зависимости от условий и времени эксплуатации изделий. Для сертификации таких специалистов разрабатывают специальные программы, учитывающие специфику методов контроля НДС (НДС–СТ) и определения указанных характеристик [13].

Метод НК НДС-ST (STRIN TESTING) введен в перечень методов ISO 9712, а также в перечень методов НК системы добровольной сертификации персонала. Этот метод является комплексным измерительно-расчетным, концепция которого состоит в анализе и сопоставлении результатов расчета НДС на основании данных о рабочих нагрузках и остаточных напряжениях и контроле физическими методами показателей НДС.

Принято выделять три группы методов контроля состояния: аналогий моделей; измерения деформаций натуральных деталей или образцов; определения изменения свойств материалов в условиях напряженного состояния и циклического динамического нагружения.

Применение какого-либо метода контроля зависит от характера механического состояния изделия или конструкции, который описывается гра-

диентом напряжений или скоростью измерения деформаций. Градиент напряжений на поверхности материала обуславливает выбор базы измерения, в которой измеренное среднее значение деформации близко к максимальному. Это особенно существенно при определении концентрации напряжений [16].

В процессе длительной эксплуатации трубопроводного оборудования при высоких температурах и давлениях в металле происходят сложные физико-химические процессы, связанные в первую очередь с распадом перлитной составляющей микроструктуры, коагуляцией и сфероидизацией карбидов, образованием микропор либо клиновидных микротрещин (рис. 2) [14, 17].

В Украине используется много объектов длительной эксплуатации, к безопасности которых предъявляются жесткие требования, которые обеспечиваются как на стадии разработки, так и в процессе эксплуатации. Среди эксплуатационных выделяются процессы оценки остаточного ресурса безопасного применения конкретных элементов трубных металлоконструкций, арматуры, сооружений, гидро- и компрессорных машин. В целом такая оценка осуществляется на основании результатов мониторинга реальной загруженности конструкции, ТД состояния материала и наличия дефектов, а также соответствующих расчетных схем оценки критических состояний в «опасных» точках конструкции. Вместе с тем, естественно, что при длительных сроках эксплуатации конструкций их механическое состояние существенно изменяется [11].

Национальная академия наук Украины под руководством академика Б.Е. Патона выполнила Целевую комплексную программу «Проблемы ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин». Разработаны методологические основы прогнозирования остаточного ресурса конструкций, создания методов, технических средств и технологий для оценки технического состояния и

продления сроков эксплуатации техногенно и экологично опасных объектов [3]. Однако в программах подготовки специалистов по НК и ТД они не отражены.

Исследования механических свойств (механического поведения) материалов в условиях циклического динамического нагружения с целью диагностирования их поврежденности и определения ресурса по указанной программе проведены под руководством академика НАН Украины В.И.Махненко. Он создал основы расчетных методов исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций [4].

По программе также выполнены НИР: Институтом материаловедения НАНУ – «Розроблення методології оцінки експлуатаційної деградації сталей за зміною механічних властивостей засобами індентування» (руководитель Г.М. Мильман, чл.-корр. НАНУ; Физико-механическим институтом им. Г.В. Карпенко НАНУ – «Розроблення методів оцінювання експлуатаційної деградації властивостей сталей магістральних трубопроводів з використанням підходів механіки руйнування і хімічного опору матеріалів» (руководитель Г. М. Никифорчин, д-р техн. наук).

Определены зависимости коэффициентов вариации (рассеивания результатов измерений) от срока эксплуатации трубных сталей в работе М.К. Петрова «Оценка степени поврежденности металла неразрушающими методами» (Тульский гос. ун-т). Показано, что изменения механических свойств сталей ДС и Х52 при длительной эксплуатации малочувствительно к эксплуатационной деградации изделий, работающих в условиях повышенного давления. Вместе с тем коэффициент вариации показателей (твердость, изнашивание, сумма событий и др.), выполненных в аналогичных условиях, лучше отображает отличия между поврежденностью металла в исходном состоянии и после эксплуатации, чем усредненные характеристики, включая механические. Эксплуатационная деградация

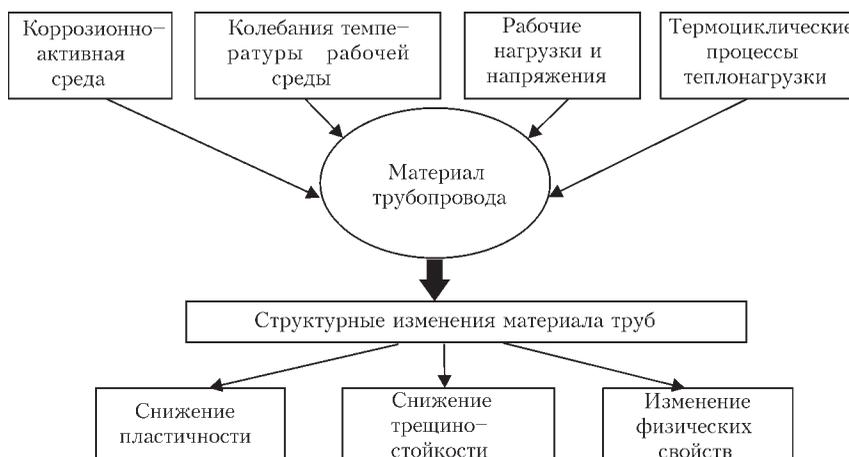


Рис. 2. Основные эксплуатационные факторы, приводящие к деградации структуры и свойств материала труб

влияет на твердость и изнашивание. Полученные результаты доказывают принципиальную возможность использования твердости, изнашивания и трещиностойкости для оценки ресурса сталей объектов повышенного давления.

Анализ кривой растяжения и твердости трубных сталей, длительно находящихся в эксплуатации, показывает, что увеличение коэффициента деформационного упрочнения эксплуатируемого металла является признаком эксплуатационной деградации [7]. При этом прочность и твердость могут как увеличиваться, так и уменьшаться. Их снижение является признаком другой стадии деградации, связанной с развитием рассеянной микрповрежденности. Это свидетельствует об особой опасности хрупкого разрушения при снижении прочности и твердости материала.

Установлено, что характеристики пластичности сталей снижаются при эксплуатации, вместе с тем возможен рост относительного удлинения, которое указывает на раскрытие множества микродефектов. В связи с этим необходимо обязательно определять относительное сужение как единую характеристику пластичности, которая одновременно отображает способность эксплуатируемого металла пластично деформироваться. Отклонение от линейности на графике растяжения отображает развитие рассеянной поврежденности, а не пластическую деформацию. В этом случае трактовка границы текучести специфическая. Характеристика пластичности может некорректно характеризовать эксплуатационную деградацию!

Трещиностойкость – один из существенных показателей деградации эксплуатируемого металла. Несмотря на низкое сопротивление хрупкому разрушению, применение методов линейной механики разрушения некорректно, поскольку эксплуатируемая сталь характеризуется низкой прочностью.

Объединение низкой прочности и низкой трещиностойкости – феномен эксплуатационной деградации (рис. 3).

Исследование природы деформирования и разрушения металлов требует особого внимания специалистов НК при непосредственном наблю-

дении за последовательностью происходящих в металле процессов при деформации в условиях эксплуатации изделий и конструкций. В первую очередь это относится к изучению кинетики процессов деформирования и деградации металлов с изменением напряженного состояния, при которых для более полной информации возникает необходимость измерения и совместной оценки различных физических параметров.

Имеющийся арсенал современных методов и средств позволяет проследить в хронологической последовательности весь процесс, связанный с деформацией и деградацией материалов, эксплуатирующихся в сложных условиях высоких температур, агрессивных сред, длительных нагрузений. Результаты, полученные с помощью различных методик, трудно сопоставимы из-за неидентичности образцов исследуемых и используемых для настройки и калибровки средств контроля, из-за невозможности измерения отдельных характеристик и разных относительных погрешностей измерительных приборов. Существенные изменения показателей пластичности и сопротивления деформированию в зависимости от структурных факторов невозможно проследить обычными методами фиксации отдельных эпизодов изменения микроструктуры и физических свойств, полученных в отрыве от процессов деформирования и разрушения в реальных условиях эксплуатации материала (рис. 4).

В процессе длительной эксплуатации сталей показатели прочности (твердость, граница текучести, граница прочности) возрастают на 10...15 %; вязко-пластические показатели (относительное сужение, относительное удлинение) уменьшаются на 5...7 %; показатели сопротивления хрупкому разрушению (ударная вязкость, трещиностойкость) уменьшаются на 15...20 % [19]. Изменение этих показателей является следствием деградации, происходящей под влиянием коррозионно-агрессивных сред, процессов деформации и разрушения, зарождения и развития микрповреждений, деформационного старения. При этом происходят изменения в структуре ме-



Рис. 3. Механические свойства сталей, изменяющиеся в процессе длительной эксплуатации трубопровода

талла, приводящие к изменению механических характеристик: текучести, прочности, ударной вязкости, твердости и др.; тепловых свойств: удельной теплоемкости, теплового расширения, теплопроводности; электрических свойств: удельного электрического сопротивления; магнитных свойств: магнитной упругости, магнитной сопротивляемости, основной кривой намагниченности, петли гистерезиса, магнитных потерь, магнитной анизотропии; комплексных эффектов: термоэлектрических явлений, магнитострикции, эффекта Холла и др. (рис. 4). Дегградация материалов, характер и распределение напряжений эффективно определяют оптическим, магнитным, вихретоковым, электрическим, радиационным и акустическим видами контроля [18, 20].

Программы подготовки персонала по видам контроля дефектности разработаны всеми органами сертификации, а программы обучения по контролю дегградации и напряженного состояния отсутствуют. Национальным авиационным университетом разработаны рекомендации по составлению таких программ для обучения и сертификации персонала [21], а также рассмотрены методы оценки компетентности специалистов [22, 23]. Программа обучения составлена с учетом нахождения взаимосвязей между изменениями физических свойств материалов и параметров используемых физических полей.

Некоторые из рекомендаций для методов контроля, которые наиболее широко применяют на практике, приведены ниже.

1. Электросопротивление является важнейшим свойством металла с точки зрения элект-

тронной теории. Любое отклонение от полной периодичности кристаллической решетки металла вызывает рассеяние электронов проводимости и, следовательно, создает электросопротивление. Связь электросопротивления с характеристиками электронного строения металлов, подвижностью электронов и их плотностью дает возможность определить такие изменения в металле, которые недоступны другим методам.

Методы измерения электросопротивления достаточно чувствительны и позволяют оценить пластическую деформацию, ползучесть металлов и сплавов, дефекты в кристаллах и точечные дефекты в металлах, а также провести микромеханические исследования свойств материалов.

Электрический метод контроля напряженного состояния реализуется с применением проводочных тензометров. Тензорезисторы удобны для крепления на различных поверхностях, имеют малые габариты и массу. Они широко используются для измерения временных и остаточных деформаций и напряжений  $\sigma$ . В основе метода лежит свойство изменения сопротивления материалов изделия пропорционально изменению их длины. Деформация, которая возникает, приводит к изменению длины проволоки и, соответственно, к изменению электрического сопротивления  $R$ . Изменение сопротивления, вызванное деформацией изделия, характеризует взаимосвязь между законами Ома и Гука:  $\sigma = \Delta RE/RK$ , где  $E$  – модуль Юнга;  $K$  – коэффициент чувствительности тензорезистора, показывающий во сколько раз величина удельного сопротивления изменяется больше



Рис. 4. Модель влияния внешних факторов на изменение физико-механических свойств

длины. Эта зависимость характеризует напряженное состояние в требуемой точке [7].

2. Рентгенографию применяют для определения контактной усталости. При циклическом действии нагрузок проявляется усталостный характер явлений, происходящих у поверхностных слоев металла. Процессы, происходящие в металле, усложняются вследствие локальности нагружения и значительного градиента напряжений в поверхностном слое. Эти напряжения вызывают пластические сдвиги и сопровождаются структурными изменениями в поверхностных слоях, которые резко затухают на небольшой глубине. Рентгеноструктурный анализ позволяет количественно оценивать изменения тонких структурных характеристик [6]. Для напряжений  $\sigma_\varphi$ , действующих на поверхности в некотором фиксированном направлении азимутального угла в плоскости поверхности образца  $\varphi$ , эта связь выражается так:  $\varepsilon_{\psi\varphi} = [(1+\mu)\sigma_\varphi \sin^2\psi/E] + \varepsilon_1$ , где  $\psi$  – полярный угол между нормалью к исследуемой поверхности и нормалью к отражающим поверхностям, который характеризует угол поворота образца  $\varphi$  от фокусирующего положения;  $\varepsilon_{\psi\varphi}$  – деформация параметров кристаллической решетки в направлении  $\psi$ ;  $\varepsilon_1$  – относительная деформация решетки при  $\psi = 0$ ;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $E$  – модуль Юнга. Исследуемый объект рентгенографируют при нескольких значениях  $\psi$  в двух взаимно перпендикулярных направлениях: тангенциальном ( $\varphi=0$ ) и осевом ( $\varphi=90^\circ$ ), что позволяет определить напряженное состояние по величине третьего главного напряжения  $\sigma_3 = [(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3(1+\mu)/\mu)\mu E / (1 - \mu - 2\mu^2)]$ , где  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  – деформация решетки в трёх основных направлениях. Сумма главных напряжений на поверхности образца:  $\sigma_1 + \sigma_2 = \sigma_\varphi + \sigma_\varphi = 90^\circ = -E\varepsilon_\psi = 0^\circ/\mu$ . В зависимости от длины волны рентгеновского излучения исследуются контактные напряжения, усредненные в слое определенной толщины ( $\approx 12, 10^{-6} \dots 25, 10^{-6} \mu$ ). Чувствительной характеристикой структурных изменений при контактной усталости является также ширина рентгеновских интерференционных полос, которая дает представление об изменениях в такой кристаллической структуре поверхностного слоя материала [7].

3. Применение оптической интерферометрии позволяет совершать бесконтактный съём информации о микроперемещениях (деформации). Для измерения истинного поля перемещений и деформаций локальных зон современных конструкций и изделий применяют методы лазерной интерферометрии [9]. Возможности практического применения методов оптической интерферометрии расширяются путем применения волоконно-оптической техники. Фаза световой волны, выходящей из волокна, изменяется за счет изменения длины, диаметра волокна и его показателя преломления, т.

е. если относительная деформация в одном и другом волокне неодинаковая, то это проявляется в виде смещения интерференционных полос, которое возможно измерить. Изменение фазы на единицу длины волокна и единицу измеряемого физического параметра  $\Delta\Phi/SL$  ( $\Delta\Phi$  – фазовый сдвиг;  $L$  – длина волокна;  $S$  – параметр, который обуславливает изменение фазы). Это величина, несущая информацию об измеряемом объекте. Датчик для измерения деформации изделия состоит из двух волокон. Они прокладываются вдоль изделия таким образом, чтобы при деформации одно волокно растягивалось, а другое сжималось. При этом деформационно-оптический эффект выражается в изменении индикатрисы, которая характеризуется вектором деформации и деформационно-оптическим тензором. В оптически изотропных материалах при их деформировании внешними усилиями возникает удвоенное лучепреломление как результат распространения плоскополяризованных волн, плоскости колебаний которых взаимно перпендикулярны.

Исследованиями установлено, что главные оси напряжений совпадают с главными осями оптической симметрии. Изделия в виде пластины, находящейся в плоском напряженном состоянии, следует рассматривать как соединение элементарных кристаллов разной ориентации, которые имеют свойство двойного лучепреломления. Главные показатели преломления  $n_1$  и  $n_2$  связаны с главными напряжениями  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  линейной зависимостью  $n_1 - n_2 = c(\sigma_1 - \sigma_2)$ , где  $c$  – оптическая постоянная, зависящая от материала и длины волны применяемого света. Разница в скорости волн используемого света является причиной упреждения колебаний одного из лучей при выходе из объекта контроля на величину, которая называется разницей хода лучей  $\delta = \alpha(n_1 - n_2) = c\alpha(\sigma_1 - \sigma_2)$ , где  $\alpha$  – толщина исследуемой пластины. Измеряя разности хода  $\delta$  в этих точках пластины, получают значение разницы главных напряжений в этих точках изделия.

4. Из магнитных методов при оценке эксплуатационных изменений в металле в процессе деградации по усталостному типу (т.е. совокупности изменений свойств металла из-за напряжений, температуры, давления, коррозии, воздействия агрессивных сред, радиационного облучения) эффективен метод коэрцитивной силы (МКС). Информационный параметр контроля в этом подходе – это коэрцитивная сила  $H_c$ . Ее величина возрастает на 300...400 % для ферромагнитных конструктивных марок сталей широкого применения, когда металл в режиме малоциклового усталости и статического-квазистатического нагружения накапливает необратимую микроповрежденность, начиная от исходного состояния до предразруше-

ния [12, 17]. В МКС остаются некоторые неясности, но, пожалуй, только на уровне представлений философии познания и фундаментальной науки на стыке механики разрушения [11], магнетизма и общих аспектов физики твердого тела. На прикладном уровне все проверено, методически выстроено, готово к практическому применению и успешно работает в массовой экспертизе. Испытаны и метрологически упорядочены приборы, формируются соответствующие методики или дополнения к ним. Ведется обучение персонала в учебном центре.

Полезно обобщенное представление текущего значения величины  $H_{ct}$  как совокупности трех компонент:  $H_{ct} = H_{co} + H_{cy} + H_{cn}$ , где  $H_{co}$  – определяется химсоставом и процессом производства металла как такового;  $H_{cy}$  – появляется и накапливается при возникновении необратимых микроразрушений по усталостному типу;  $H_{cn}$  – компонента наличия обратимых (упругих) напряжений любого рода. С увеличением срока службы (в зонах концентрации напряжений) составляющая  $H_{cy}$ , возникнув, непрерывно растет. Для режима надежной эксплуатации должно выполняться неравенство  $H_{ct} < H_{cb}$ , где  $H_{cb}$  – коэрцитивная сила, которая характеризует предел прочности материала. Из этого выражения следует, что по мере накопления усталостных изменений в зоне концентрации напряжений металл начинает разрушаться при напряжениях в нем, заметно меньших величины его справочного предела прочности ( $H_{cb}$ ). Это становится возможным из-за ухудшения механических свойств при развитии деградации по усталостному типу, причем зачастую в бездефектном металле. По мере необратимого роста усталостной составляющей  $H_{cy}$  на фоне неизменной природной составляющей  $H_{co}$  – область определения  $H_{cn}$  неуклонно сокращается по верхней границе. Коэрцитиметрия дополняет сложившуюся систему методов в экспертизе металла до сих пор недоступной информацией об усталости металла с ее количественной и качественной оценкой. Особенно это касается общей накопленной усталости металла всего сооружения (конструкции) с указанием локальных зон концентрации факторов деградации, с количественным измерением в общем и в каждой из локальных зон, с оценкой скорости накопления и прогнозом остаточного ресурса в части состояния металла.

Магнитоупругий метод основан на анализе зависимости магнитной проницаемости ферромагнитных материалов от напряженно-деформированного состояния материала. Под действием механических напряжений деформируется кристаллическая решетка и атомы смещаются со своих нормальных положений. При этом изменяется характер магнитного взаимодействия в кристал-

ле. На кристаллографическую анизотропию накладывается магнитоупругая, вызванная дополнительными взаимодействиями атомов в результате искривления кристаллических решеток при деформации. При механических деформациях энергия анизотропии получает прирост, являющийся линейной функцией компонента тензора деформации. Она называется магнитоупругой энергией. Термодинамическое соотношение между изменением размеров ферромагнитного тела в направлении действия внешнего намагничивающего поля  $H$  и изменениями индукции  $B$  под действием механических напряжений  $\sigma$  показывает, что с увеличением  $\sigma$  намагниченность ферромагнетика увеличивается, если он имеет положительную магнитострикцию  $\Delta e/e$ , непрерывно увеличивающуюся с напряженностью  $H$  поля. Таким образом, действие  $\sigma$  при заданной напряженности  $H$  изменяет индукцию  $B$ , а вместе с ней и магнитную проницаемость  $\mu$ .

Исходя из законов сохранения энергии, при намагничивании ферромагнитного тела до индукции  $B$  при напряженности  $H$  магнитная энергия  $\omega$

$$\omega = \int_0^B Hd / (8\pi) .$$

При деформации тела на величину  $\epsilon = \Delta e/e$  для его намагничивания до индукции  $B$  необходимо поле напряженностью  $H_1$ . Получим зависимость

$$\sigma\epsilon = \int_0^B H_0 dB / (8\pi) - \int_0^B H_1 dB / (8\pi) .$$

Это соотношение наблюдается в области упругих деформаций. Упругая деформация содействует росту магнитной проницаемости, а пластическая – ее уменьшению.

5. Ультразвуковой метод определения напряжений в твердых материалах основан на закономерностях распространения упругих волн. При исследовании волновых задач при нагруженных объектах контроля составляют линейризованные уравнения движения и граничные условия [6, 10].

Если в упругом изотропном нагруженном теле с начальными деформациями распространяются плоская гармоническая волна, то скорость распространения волн в направлении оси  $c_1$  характеризуется тремя уравнениями. Одно определяет скорость распространения волны  $C_{lx}$ , а два других – скорости волн сдвига  $C_{lx2}$  и  $C_{lx3}$ . Их определяют из выражений [10]:  $\rho c^2 l x_1 = \lambda_1^4 a_{11} + \sigma_{11} \lambda_1^2$ ;  $\rho c^2 l x_3 = \lambda_1^2 \lambda_3^2 \mu_{13} + \sigma_{11} \lambda_1^2$ ; где  $\rho$  – идеальная плотность материала;  $c$  – скорость преломления;  $\lambda$  – длина пути по соответствующей координате;  $\sigma$  – компоненты тензора начальных напряжений;  $\mu$ ,

$a$  – параметры, характеризующие упругий потенциал  $\phi^0$ .

Упругий потенциал  $\phi^0$  в общем для анизотропного тела является функцией компонент тензора деформаций  $\phi^0 = \phi(\epsilon_{23}^0)$ , а для изотропного тела  $\phi^0$  – функция инвариантов тензора деформации  $\phi^0 = \phi(A_i^0)$  при  $i = 1, 2, 3$ , где  $A_i$  – алгебраические инварианты тензора начальных деформаций  $A_1^0 = \epsilon_{in}^0$ ;  $A_2^0 = \epsilon_{ln}^0 \epsilon_{ni}^0$ ;  $A_3^0 = \epsilon_{in}^0 \epsilon_{np}^0 \epsilon_l^0$  [10]. Для определения напряжений необходимо знать изменение скоростей сдвиговых волн  $C_{\text{тх}2}$  и  $C_{\text{тх}3}$  при поляризации вдоль каждой из главных напряжений, а также значения скорости сдвиговой волны в ненагруженном теле и механические свойства исследуемого объекта. При определении одноосных напряжений достаточно знать поляризацию каждой волны вдоль и поперек напряжений, а также механические свойства материала.

### Выводы

Рассмотренные рекомендации раскрывают направления по обучению и аттестации персонала на основании анализа опубликованных результатов исследований, полученных специалистами при контроле НДС и деградации материала различных металлоконструкций трубопроводного транспорта.

К специалистам, занимающимся диагностикой остаточного ресурса, предъявляются повышенные требования, поэтому они должны иметь не только навыки работы со средствами контроля, но и знаниями в области сопротивления материалов, прочности, деградации свойств и механики разрушения материалов, хорошо ориентироваться в нормативной и методической документации, знать особенности объектов контроля; уметь проводить расчет напряженного состояния и контроль физическими методами параметров НДС. Однако нормы оценки качества металлоконструкций, которые отражены в СНиП и национальных стандартах негармонизованы с требованиями международных стандартов серии ISO 9000. Гармонизация норм оценки качества длительно эксплуатируемых конструкций трубопроводного транспорта, техногенно и экологично опасных объектов достигается созданием систем управления качеством конкретного изделия, которые разработаны в соответствии с требованиями ДСТУ ISO 9001.

В системе управления качеством отображают действующие нормы на оценку качества изделия от его создания до захоронения. Должны быть указаны методы контроля, а также программы подготовки и аттестации персонала с оценкой его компетентности диагностировать деградацию материала объекта контроля.

Программы сертификации специалистов по диагностике объектов трубопроводного транспорта

разрабатывают с раскрытием физических основ методов НК, а также с обязательным изучением следующих вопросов:

- прочности несущих элементов металлоконструкций;
- критериев ресурса, определение параметров ресурса;
- работоспособности и живучести металлоконструкций, запасов прочности;
- роли расчетов и экспериментов при определении запасов прочности и ресурса;
- стадий разрушения при общем ресурсе;
- расчетов штатной и аварийной ситуации;
- ориентации технического регулирования;
- факторов, которые необходимо учитывать при расчете остаточного и циклического ресурса;
- накопленные повреждения;
- критериев трещиностойкости и живучести;
- скорости роста трещин;
- информативных методов определения остаточного ресурса и безопасности;
- штатной и аварийной диагностики состояния технических систем.

1. *Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин / Зб. наук. ст. // Під наук. керівн. Б.Є. Патона. – Київ: ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, 2006. – 589 с.*
2. *Техническая диагностика остаточного ресурса и безопасности: Уч. пос. // Под ред. В.В. Клюева. – М.: Спектр, 2011. – 187 с.*
3. *Махненко В. И., Великоиваненко Е. А. Трещины стресс-коррозии в зоне сварного соединения № 11 парогенераторов ПГВ-1000М / Пробл. ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин. – Київ: ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України, 2006. – С. 2–10.*
4. *Махненко В. И. Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций. – Київ: Наук. думка, 1976. – 320 с.*
5. *Белокур И. П., Коваленко В. А. Дефектоскопия материалов и изделий. – Киев: Техника, 1989. – 196 с.*
6. *Бобренко В. М., Вангели А. Н., Куценко А. Н. Акустические методы контроля напряженного состояния материала деталей машин. – Кишнев: Штица, 1981. – 252 с.*
7. *Білокур І. П. Елементи дефектології при вивченні неруйнівного контролю. – Київ: Вища шк., 1987. – 196 с.*
8. *Белокур И. П. Дефектология и неразрушающий контроль. – Киев: Вища шк., 1989. – 205 с.*
9. *Методы контроля и исследования легких сплавов: Справ. / Л. М. Вассермен, В. А. Данилишин, О. С. Коробов и др. – М.: Металлургия, 1985. – 510 с.*
10. *Гузь А. Н., Махорт Ф. Г. Механика связанных полей в элементах конструкций. Акустоэлектромагнитоупругость. – Киев: Наук. думка, 1988. – 286 с.*
11. *Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідн. / Під ред В.В.Панасюка. – Киев: Наук. думка, 1988. – 120 с.*
12. *Неруйнівний контроль і технічна діагностика: Т. 5 / Під ред. З. Т. Назарчука. – Львів: ФМІ ім. Г. В. Карпенко, 2001. – 1134 с.*
13. *Аттестация персонала в области неразрушающего контроля / С. В. Клюев, Н. Н. Коновалов, С. Г. Копытов, М. О. Соловьева // Метрология в неразрушающем контроле: Учеб. пособие под ред. В. В. Клюева. – М.: Спектр, 2011. – 200 с.*
14. *Структурно-фазовое состояние, поля внутренних напряжений и акустические характеристики в длительно работающем металле поврежденного барабана котла высоко-*

- го давления / А. Н. Смирнов, Н. В. Абабков, Э. В. Козлов, В. В. Муравьев // Контроль. Диагностика. – 2012. – № 7.
15. *Троицкий В. А.* Основные тенденции развития неразрушающего контроля металлоконструкций по результатам 18-й Всемирной конференции по НК. – Киев: Информ. бюлетьень №3(55). – С. 7–13.
  16. *Махутов Н. А., Гаденин М. М.* Техническая диагностика остаточного ресурса и безопасности / Под ред. В.В.Клюева. – М.:Спектр, 2011. – 187 с.
  17. *Обзорная* оценка состояния и детальная экспертиза усталости металла больших размеров объектов и конструкций неразрушающим коэрцитиметрическим методом / Г. Я. Безлюдько, О. П. Завальнюк, В. Б. Нестеренко и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль – 2012. – № 3. – С. 57–65.
  18. *Мындюк В. Д., Доценко Е. Р., Карпаш М. О.* Особенности деградации структуры материалов металлоконструкций длительной эксплуатации и оценка возможности ее диагностики в нефтегазовом комплексе / Научн. вест. ИФНТУНГ. – 2011 – №2(28). – С. 91–97.
  19. *Доценко Е. Р., Карпаш М. О., Карпаш О. М.* Дослідження методу визначення напруження плинності конструкцій-них сталей за значенням їх питомого опору // Методи та прилади контролю якості. – 2010. – № 24. – 105–111.
  20. *Информационное* и методическое обеспечение работ по определению механических свойств стальных конструкций неразрушающими методами контроля / О. М. Карпаш, М. О. Карпаш, Н. Л. Татсанович, Е. Р. Доценко // Prjceedings XXVII Intern. conf. NDT days 2012-DEFECTOSKOPIA 12 11–15 June 2012. Sozopol-Bolgaria. – S. 269–272.
  21. *Блокур І. П.* Сертифікація персоналу. – Київ: Вид-во Нац. авіац. ун-ту «НАУ-друк», 2009. – 220 с.
  22. *Мухаровський М., Хімичева Г.* Моделювання комплексної оцінки компетентності персоналу // Там само. – 2005. – № 3. – С. 21–25.
  23. *Мухаровський М., Хімичева Г., Глухова О.* Моделювання процесів органу сертифікації персоналу // Стандартизація, сертифікація, якість. – 2006. – № 6. – С. 53–61.
  24. *ISO/IEC 17024–2003.* Оцінювання відповідності. Загальні вимоги до органів з сертифікації персоналу.
  25. *Фарлі М.* Посібник з атестації та сертифікації персоналу з неруйнівного контролю, – 2012. – 15 с.
  26. *EN ISO 9712.* Неруйнівний контроль – Атестація і сертифікація персоналу з неруйнівного контролю.

Comparative analysis of requirements to NDT personnel certification to ISO 9712, ISO 17024, EN 4179, and national requirements to personnel assessing object quality by testing results, was performed. Programs of personnel training and certification are considered, which are used by personnel certification bodies in Ukraine. It is shown that these programs do not take into account the tasks of monitoring the stress-strain state and degradation of metal structure material, which are encountered at diagnostics of unsafe objects of pipeline transportation in long-term service. It is proposed to consider in personnel certification programs the methodological fundamentals of prediction of residual life of structures and evaluation of technical condition of environmentally hazardous facilities; and introducing the processes of their realization into the quality management system for a specific item, in keeping with the requirements of DSTU ISO 9001 standard. 20 References.

*Key words:* technical state of facilities, NDT personnel certification, quality management system

Поступила в редакцию  
04.04.2013

## ПОДПИСКА — 2014

### на журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»

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

В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.

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

Подписка на электронную версию журнала  
«Техническая диагностика и неразрушающий контроль»  
на сайтах: [www.patonpublishinghouse.com](http://www.patonpublishinghouse.com), [www.rucont.ru](http://www.rucont.ru).

**Контакты:**

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

Подписано к печати 31.10.2013. Формат 60×84/8. Офсетная печать.  
Усл. печ. л. 9,04. Усл.-отт. 9,89. Уч.-изд. л. 10,24 + 4 цв. вклейки.  
Печать ООО «Фирма «Эссе».  
03142, г. Киев, просп. Акад. Вернадского, 34/1.

## НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕМИНАР «МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ДИАГНОСТИКИ И КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ РАЗНОГО ДИАМЕТРА»

16 октября 2013 г. в Выставочном центре «КиевЭкспоПлаза» был проведен научно-технический семинар «Методы и средства диагностики и контроля технического состояния трубопроводных систем разного диаметра».

*Организаторы семинара: НТК ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, Дочерняя компания «Укртрансгаз», Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики.*

Было заслушано 12 докладов, которые подготовили представители ИЭС им. Е. О. Патона, ДК «Укртрансгаз», Физико-механического института им. Г. В. Карпенко НАН Украины, Ивано-Франковского института нефти и газа, ООО «Сантел газнефтьавтоматика» (г. Саратов, Россия).

Доклады на семинаре были посвящены различным аспектам диагностики и контроля технического состояния трубопроводных систем различного назначения: магистральных газотранспортных систем, технологических трубопроводов промышленных и энергетических предприятий и др. Особый интерес вызвали доклады, представленные ИЭС им. Е. О. Патона и посвященные оценке эксплуатационной поврежденности элементов трубопроводных систем (А. С. Миленин), стресс-коррозионного разрушения сварных соединений магистральных трубопроводов (А. А. Рыбаков), влиянию катодной поляризации на защитные

свойства полимерных покрытий трубопроводных систем (Л. И. Ныркова, С. А. Осадчук).

Интересные доклады были представлены отделом неразрушающих методов контроля ИЭС им. Е. О. Патона, посвященные применению электронной флэш-радиографии при контроле технологических трубопроводов (В. А. Троицкий, В. Н. Бухенский) и использованию низкочастотных ультразвуковых направленных волн для оценки технического состояния технологических трубопроводов (В. А. Троицкий, А. И. Бондаренко).

Физико-механическим институтом им. Г. В. Карпенко НАН Украины (Р. М. Джела) был представлен интересный доклад, в котором рассмотрены методы и системы для обследования технического состояния подземных трубопроводов и используемые для этого портативные приборы.

Большой интерес у слушателей семинара вызвали работы, которые проводит ООО «Сантел газнефтьавтоматика» (г. Саратов, Россия) по внешне-трубной диагностике магистральных трубопроводов и обеспечению качественной сварки труб, имеющих средний и высокий уровень намагничивания.

В работе семинара принимали участие 40 представителей из ДК «Укртрансгаз», Национального авиационного университета, ИЭС им. Е. О. Патона, Полтавского ГОК и др. организаций.

*А. И. Бондаренко*

## МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ ТА ВИСТАВКА «НАФТОГАЗОВА ЕНЕРГЕТИКА 2013»

7–11 жовтня 2013 р. в Івано-Франківську відбулась чергова Міжнародна науково-технічна конференція «Нафтогазова енергетика 2013» відповідно до плану наукових заходів Міністерства освіти і науки України.

*Співорганізаторами конференції виступили: Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу та Полтавський національний технічний університет ім. Ю. Кондратюка.*

Пленарне засідання конференції відкрив та виступив із доповіддю ректор ІФНТУНГ, член-кор. НАН України Крижанівський Є. І., який підкреслив важливість оцінки ступеню деградування матеріалів, що використовуються в нафтогазовій галузі протягом тривалого часу.

Паралельно на шести секціях були представлені доповіді за напрямками: нафтогазова інженерія, енергозаощадження та відновні джерела енергії, контроль та вимірювання, науки про Землю, управління та інновації, а також трубопровідний транспорт.



Необхідність проведення такої конференції зумовлена інтенсивністю перетворень та реформ, що відбуваються в нафтогазовій галузі України та Європи – поява нових джерел вуглеводнів (сланцевий газ, шахтний метан), зміна напрямів транзиту природного газу та нафти. Для вчених та представників промисловості конференція — це чудова нагода координувати свої дії та плани, уточнити потреби та можливості науково-технічного розвитку тощо.

У роботі конференції взяли участь понад 250 науковців з України, Росії, Алжиру, Польщі, Угор-

щини та Словаччини. Серед підприємств реального сектору економіки, представники яких взяли участь в конференції, слід згадати такі: ПрАТ «Природні ресурси», НДПІ ПАТ «Укрнафта», НАК «Нафтогаз України», ООО «Вега-ГАЗ» (Росія), ПАТ «Укртрансгаз», Львівський ДЦНП, УМГ «Прикарпаттрансгаз», ПАТ «Укртранснафта», УМГ «Львівтрансгаз», Метрологічний Центр НАК «Нафтогаз України», ТОВ «Мелітек Україна», УМГ «Київтрансгаз», УМГ «Черкаситрансгаз», ТОВ «Нафтогазбудізоляція», ІК «Машекспорт», УкрНДІгаз.

Університети, що взяли участь в конференції: НУ «Львівська політехніка», Інститут фізики металів Уральського відділення Російської академії наук (Росія), МНТУ ім. Ю. Бугая, Університет Буйра (Алжир), Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Уфимський державний нафтовий університет (Росія).

В рамках конференції відбулась виставка наукових розробок, в якій взяли участь підрозділи ІФНТУНГ, ПолНТУ ім. Ю. Кондратюка та підприємства реального сектору економіки.

За визнанням усіх учасників конференції, вона послужила майданчиком для нових ділових контактів, визначення форм та напрямків науково-технічного міжнародного співробітництва, виникнення та ґрунтовного обговорення нових ідей та проектів.

*Карнаш М. О.*

## ЕВРОПЕЙСКИЙ ФЕЙЕРВЕРК МЕРОПРИЯТИЙ В ОБЛАСТИ NDT

Октябрь 2013 г. запомнится яркой чередой событий европейского уровня, связанных с неразрушающим контролем. В их числе конференция «Сертификация 2013» в Загребе (Хорватия), 45-е Совещание Совета директоров EFNDT, Генеральная ассамблея Международной академии NDT, проведенная в Брешиа (Италия) и Женеве (Швейцария), встреча представителей двух крупнейших организаций в области НК EFNDT и ASNT в Порторозе (Словения).

Украинское общество НК и технической диагностики (УОНКТД) как член Европейской федерации NDT активно участвовало в основных мероприятиях этого цикла.

УОНКТД делегировало 14 специалистов Украины на европейскую конференцию «Сертификация 2013». Доклады В. А. Троицкого «О системе сертификации персонала в Украине» (докладчик С. А. Щупак) и М. Л. Казакевича, Н. П. Мигуна «Сертификация дефектоскопи-

ческих материалов» вызвали большой интерес участников.

В ходе работы 45-го заседания Совета директоров EFNDT, которое состоялось в рамках конференции, обсуждались такие вопросы, как стратегический план деятельности EFNDT, сотрудничество с ведущими европейскими организациями (СЕОС, EUROLAB, EFW), стра-





Участники заседаний Генеральной ассамблеи на фоне Большого адронного коллайдера

тегия деятельности Европейского комитета по сертификации, подготовка конференций в Праге (Чехия, октябрь 2014 г.) и Гетеборге (Швеция, 2018 г.) и др.

По просьбе Президента Европейской федерации М. Pürchke с докладом «Концепция Виртуального музея НК» выступил вице-президент УОНКТД, член Совета директоров EFNDT М. Л. Казакевич. В ходе обсуждения его выступления Советом принято решение поддержать работу по созданию виртуального музея НК.

Из Загреба украинская делегация прибыла в Италию, где в Брешиа состоялась Генеральная ассамблея Международной академии НК.

Темой первого дня заседаний Академии было обсуждение программы деятельности IANDT в последующие три года и прием новых действительных членов. В результате в состав организации было акцептировано два новых академика. Приятно отметить, что один из них – украинский ученый, сотрудник Физико-механического института им. Г. В. Карпенко НАН Украины В. Н. Учанин. По традиции он сделал обзорный доклад по материалам своих работ в области вихретокового метода НК.

На сегодняшний день в состав Международной академии NDT входят четыре представителя НАН Украины и в их числе почетный член IANDT, Президент Национальной академии наук Украины академик Б. Е. Патон.

Второй день заседаний Генеральной ассамблеи прошел в Женеве на территории CERN (Европейского совета ядерных исследований). В ходе экскурсии делегацию ознакомили с устройством Большого адронного коллайдера и результатами проводимых там исследований. Увиденное нами «восьмое чудо света» потрясает масштабом научно-технической мысли и вселяет надежду на возможность совместной деятельности мирового сообщества, в том числе в области НК и диагностики объектов повышенного риска.

При сооружении коллайдера были широко использованы методы дефектоскопии. Для примера достаточно сказать, что туннель, в котором разгоняют заряженные частицы, имеет длину окружности 26,7 км, а рабочее давление в нем в десять раз меньше давления газов у поверхности Луны. Обеспечение такого вакуума предъявляет очень высокие требования к средствам контроля герметичности.

Наше посещение CERN совпало с сообщением о присуждении Нобелевской премии по физике за открытие «частицы бога» – бозона Хиггса, которую обнаружили 7 июля 2012 г. именно в CERN.

Итак, позади 5500 км а впереди новые мероприятия европейского фейерверка в области НК.

*Казакевич М. Л.*



## НПП «УЛЬТРАКОН-СЕРВИС» – 20 ЛЕТ

Важное событие в мире НК Украины ознаменовало 2013 г. – юбилей отечественного разработчика и производителя средств НК, научно-производственного предприятия «УЛЬТРАКОН-СЕРВИС».

НПП «УЛЬТРАКОН-СЕРВИС» уже 20 лет занимается разработкой, производством и сервисным обслуживанием приборов, комплексов, средств НК, которые заслужили всеобщее признание в Украине, в странах ближнего и дальнего зарубежья благодаря своему качеству и широкому ассортименту.

Начиналось все в июне 1993 г. На тот момент в Украине не было отечественных производителей, а импортные приборы характеризовались высокой стоимостью и отсутствием сервисной и консультационной базы.

НПП «УЛЬТРАКОН-СЕРВИС» организовало сервисное обслуживание и ремонт импортных приборов, стало официальным представителем в Украине итальянской компании «Namicon». В это же время началась разработка и производство собственных моделей пьезоэлектрических преобразователей. В настоящее время на счету фирмы разработка порядка двух тысяч типов специализированных преобразователей различного назначения.

Первым прибором собственной разработки стал микропроцессорный твердомер ТДМ-1. В мае 1996 г. он был представлен на выставке «Неразрушающий контроль-96» и в том же году был налажен серийный выпуск прибора. Портативный динамический твердомер ТДМ-1 позволил проводить измерение твердости прямо на объекте, повысить объемы и надежность твердометрии. Наличие нескольких шкал твердости позволило быстро и эффективно проводить забровку изделий и заготовок.

Затем был разработан толщиномер ультразвуковой ТУЗ-1, который был представлен весной 1997 г. на выставке «Сварка-97». Прибор предназначен для измерения толщины заготовок и изделий из металлов и сплавов, стенок трубопроводов, сосудов давления, котлов, резервуаров и других объектов повышенной опасности.

Качественно новым шагом в работе НПП «УЛЬТРАКОН-СЕРВИС» явилось создание в 1997 г. компьютеризированного дефектоскопа УД2-70. Новый прибор существенно отличался от морально устаревшего УД2-12. Ушли в прошлое длительные перенастройки прибора при переходе от одной схемы контроля к другой, ис-

пользование нескольких дефектоскопов по количеству схем контроля и типов изделий. Теперь переход осуществлялся одним нажатием кнопки. Электролюминесцентный экран высокой контрастности дал возможность работать в более широком диапазоне освещенности. Интегральная система документирования позволила получать отчеты по результатам контроля, соответствующие мировым стандартам. Цифровая обработка сигналов способствовала повышению соотношения сигнал/шум. Полученные от предприятий отзывы о работе говорили о полном принятии специалистами нового прибора, о его высоких эксплуатационных характеристиках.

В последующие годы появились новые приборы. Это толщиномеры ТУЗ-2 и ТУЗ-5, твердомер ТДМ-2, ультразвуковые дефектоскопы УД3-71 и УД4-76, новые пьезоэлектрические преобразователи, стандартные образцы для настройки приборов и многое другое.

Расширение производства и увеличение номенклатуры продукции привело к созданию в 1996 году нового предприятия – НПП «Промприлад», которое также успешно развивается и становится центром разработки и производства средств НК.

В 21-й век коллектив НПП «УЛЬТРАКОН-СЕРВИС» вошел опытным, сплоченным, полным новых замыслов и идей. Появляются новые направления деятельности, ставятся новые, более серьезные и интересные задачи.

В 2003 г. по инициативе кандидата технических наук, чл.-корр. Транспортной академии Украины Луценко Г. Г. был создан Украинский научно-исследовательский институт НК (УкрНИИНК), который стал базой для разработок новых средств и технологий НК, технологической документации.

Перспективным направлением развития института стала разработка и внедрение автоматизированных систем НК продукции железнодорожного транспорта и трубной промышленности, которые позволяют обновить парк устаревшего оборудования на предприятиях. Это позволило повысить достоверность и качество контроля, и, как следствие, качество производимой продукции.

Появились такие системы как:

– установки УЗК колес САУЗК-1 «Юг», САУЗК-2 «Север»;

– установка автоматизированного УЗК концов труб САУЗК Унискан-ЛуЧ «КТ-7»;

– системы механизированного УЗК листового проката «Унископ 9П», стальной ленты УКТЛ и вихретокового контроля слябов «Унископ 10СЛ»;

- установки магнитопорошкового контроля колес УМПК-1, УМПК-2, УМПК-3, УМПК-5 и муфт железнодорожных вагонов УМПК-4М;
- система УЗК валов коробки передач СКВ-01;
- установка автоматизированная для комплексного НК колесных пар вагонов СНК КП-8;
- установки автоматизированного УЗ и вихретокового контроля железнодорожных осей САУЗК «Ось-1» и СНК «Ось-3»;
- установка автоматизированного УЗК железнодорожных осей иммерсионным методом САУЗК Унискан-ЛуЧ «Ось-4»;
- системы автоматизированного УЗ (СНК Унискан-ЛуЧ Т-18) и вихретокового (СНК Унискан-ЛуЧ Т-18ВТ) контроля тела трубы;
- установки измерения скорости распространения ультразвука УИСУ-01;
- установка АЭ-РБ-1 акустико-эмиссионного контроля боковых рам и надрессорных балок тележек грузовых вагонов модели 18-100;
- комплекс механизированного НК рельс «ОКО-3».

Для повышения безопасности движения железнодорожного транспорта был разработан в 2003 г. рельсовый дефектоскоп УДС2-73. В начале 2004 г. проведены его ведомственные испытания и по их результатам дефектоскоп принят в эксплуатацию всеми железными дорогами Украины.

Предприятием были созданы новые дефектоскопы, развивающие идеи, заложенные в предыдущих разработках:

- версия TOFD УЗ дефектоскопов УД3-71и УД4-76;
- УЗ дефектоскоп УД4-94-ОКО-01;
- вихретоковые дефектоскопы ВД3-71, ВД-131, ВД-132 и ВД3-81;
- магнитные дефектоскопы МД-01ПК, МД-4КМ и УниМАГ-01.
- многофункциональный УЗ дефектоскоп SONOCON D;
- УЗ дефектоскоп SONOCON FOCUS на фазированных решетках;
- акустико-эмиссионный комплекс ГАЛС-1.

Расширение деятельности предприятия в 2001 г. вызвало необходимость создания Учебного центра. Основными направлениями его деятельности стали подготовка дефектоскопистов по контролю объектов железнодорожного транспорта и обучение специалистов, а также сертифика-

ции в соответствии с международным стандартом ISO/IEC 17024, ISO 9712 и национальным ДСТУ EN 473 «Квалификация и сертификация персонала в области НК. Основные требования». Учебный центр работает на основании Лицензии Министерства образования и науки Украины.

На сегодняшний день на предприятии в различных отделах (методов НК, конструкторском, технического контроля, электроники и АСУТП, разработки программного обеспечения), а также на производственных участках (монтажном, монтажно-сборочном, механическом, механосборочном) работает почти 200 человек.

Продукция НПФ «УЛЬТРАКОН-СЕРВИС» пользуется большим спросом на рынке Украины, используется в работе практически всех предприятий промышленности и успешно конкурирует с продукцией других фирм в странах СНГ и дальнего зарубежья.

Развитие предприятия-разработчика и производителя средств НК не может происходить без его участия в различных научных конференциях и выставках. Стенды НПФ «УЛЬТРАКОН-СЕРВИС», без преувеличения, украшали выставки УО НКТД, «Сварка», «Машиностроение», «Промышленный форум» и другие. А с 2008 г. такой стенд привлекал внимание посетителей на международных выставках в России, Китае, ЮАР, Арабских Эмиратах, Индии, Мексике, Бахрейне, Иране, Германии.

Для организации и проведения ежегодных выставок, научных конференций, а также для издания специализированного журнала «Неразрушающий контроль» была создана Ассоциация ОКО.

На проводимых мероприятиях укрепляются традиционные связи с учеными институтами и ведущими специалистами производственных предприятий. Научные статьи, информации о новых разработках «УЛЬТРАКОН-СЕРВИС» публикуются в журнале «Неразрушающий контроль» и вызывают живой интерес специалистов.

Коллективом предприятия постоянно ведется работа по поиску технических решений, внедрению новейших научных достижений в разработку и производство средств НК. Все это является основой для устойчивого развития и позволяет быть уверенным в его будущем!

*Журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» присоединяется к многочисленным поздравлениям и желает, чтобы приобретенный ценный опыт и высокие результаты работы с каждым годом были все больше и лучше. Пусть дорога к следующему юбилею будет насыщена новыми планами, творческими идеями, реализованными проектами и финансовыми успехами!*



## УСПЕШНОЕ НОВАТОРСТВО – ДОСТИЖЕНИЕ НЕ ИНТЕЛЛЕКТА, А ВОЛИ\*

Компания «ВОТУМ» не раз представляла обзорные статьи с описанием технических возможностей своего оборудования как в составе комплексной диагностики крупногабаритных объектов подвижного состава, так и с портативными устройствами (ручными дефектоскопами). Сейчас, накануне 20-летия компании, мы подведем промежуточные итоги наших достижений. Мы были первыми среди отечественных производителей, кто представил портативный прибор для дефектоскопии с цветным экраном, мы были первыми, кто смог объединить на платформе одного прибора более десятка специализированных приложений: ультразвуковых, вихретоковых, резонансных, импедансных, ЭМА, видео и других – определив новое в дефектоскопии понятие «универсальный дефектоскоп», навсегда изменив привычные стереотипы сертификационных центров.

И сейчас хотелось бы уделить внимание прибору, который заслуженно снискал популярность среди дефектоскопистов – «Томографик УД4-ТМ». В НК

выделена большая группа методов для диагностики и последующего анализа качества и свойств исследуемых объектов, материалов и целых систем без изменения структуры, конструкции либо состояния, в котором исследуемый объект находится.

Для разных объектов диагностики инфраструктуры ОАО «РЖД», компанией Вотум разработаны отдельные рабочие комплекты (вагонные, локомотивные, путевые, моторвагонные), где прикладное применение дефектоскопа определяет набор собственных специализированных сканеров, датчиков, аксессуаров и методического обеспечения.

Неразрушающему контролю элементов верхнего строения пути с применением «Томографик УД4-ТМ» отводится ответственная роль – выборочный контроль сварных соединений стыков рельсов, а также вторичного контроля (подтверждающего), после прохождения мобильных и съемных средств диагностики.

В отличие от большинства существующих дефектоскопов, «Томографик УД4-ТМ» наиболее оптимизирован для использования в качестве прибора для вторичного контроля. По критериям надежности и универсальности он занимает достойное первое место среди отечественных, а также вполне уверенно может соперничать с западными компаниями прежде всего в ценовой нише, а также по набору программного обеспечения и аксессуаров, которые необходимы дефектоскописту в процессе работы.

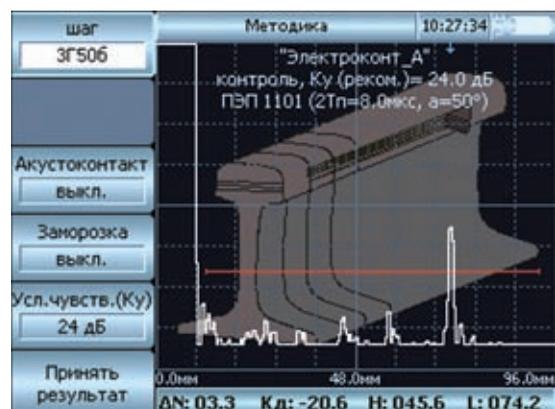
Универсальность УД4-ТМ делает его узнаваемым среди дефектоскопов, применяемых на пространстве 1520. Он надежен, по параметрам точности соответствует всем необходимым требованиям. Отдельно хотелось бы сказать относительно его технических особенностей. Для любой



Производственный участок

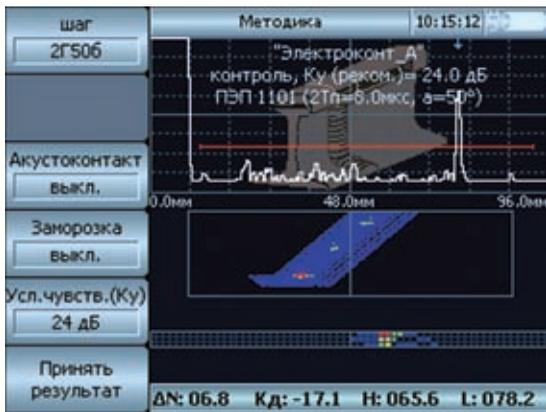


Диагностическая лаборатория



«Томографик УД4-ТМ»: контроль головки рельса, 3D проекция

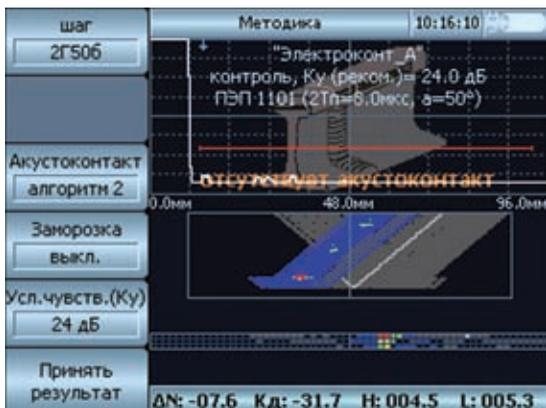
\* Статья на правах рекламы



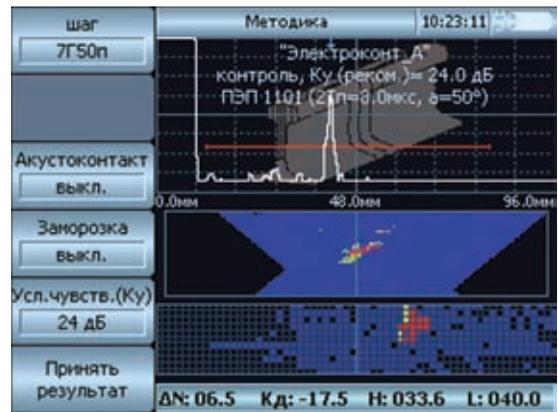
«Томографик УД4-ТМ»: контроль головки рельса (сбоку) со сканером «Слайдер», 3D проекция

области назначения и применения (УД4-ТМ компактный и легкий, размеры 125x210x85мм, масса – 2,2 кг с батареей) он мобильный, что достаточно важно на инспектируемых участках пути, где дефектоскописты работают в «окнах». Ещё раз хотелось бы уточнить, что УД4-ТМ в использовании для вторичного контроля после проведения измерений вагон-дефектоскопом работает на 100%-ное протоколирование дефектов по всему сечению рельса (головка, шейка, подошва).

Это проблемные зоны, в которых выявление дефектов затруднено. По сравнению с дефектоскопами других производителей, которые более громоздки, менее точные и узкоспециализированные, УД4-ТМ – это прибор-помощник, прибор, который предоставляет такие широкие возможности оценки дефекта, как автоматическое определение условных размеров дефекта для определения мест срабатывания АСД. Например, чтобы такой опасный дефект, как поперечные трещины в головке рельса, выявлялся более объективно, необходимо перенастроить программное обеспечение прибора на требуемый вид контроля, подключить аксессуары и начать диагностику. С «Томографик УД4-ТМ» не надо тратить время: на перенос результатов контроля с дефектоскопа на ПК, либо со съёмных носителей (флэш-карт) на ПК, а затем проводить расшифровку информации, например,



«Томографик УД4-ТМ»: сканер «Слайдер». Сигнализация об отсутствии акустоcontactа при диагностике головки рельса

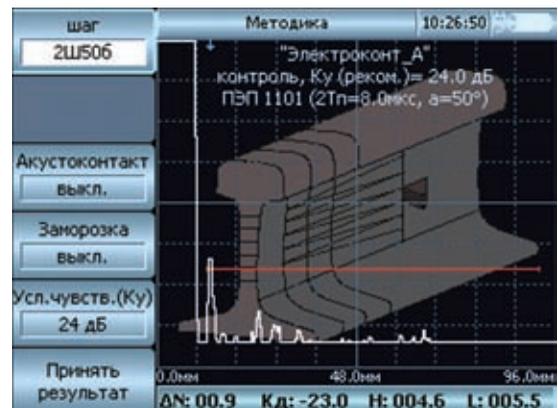


«Томографик УД4-ТМ»: 3D проекция контроля с поверхности головки рельса. Томографическое изображение дефекта в проекции рельса

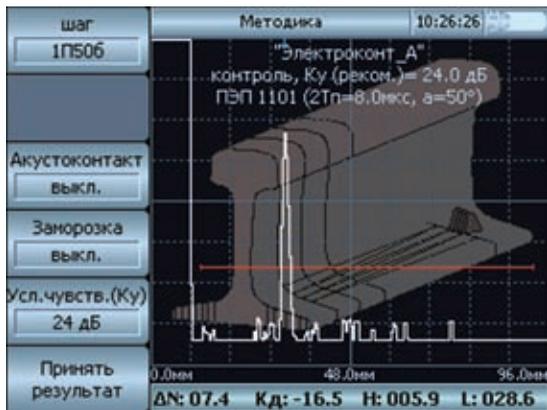
если мы говорим о состоянии рельсов, элементов стрелочных переводов.

Нет необходимости следить за соблюдением операторами объемов контроля и выполнением почасового графика работы (об этом см. ниже), а также в натурной допроверке расшифровок дефектограмм. Всё это делается автоматически самим прибором УД4-ТМ. Протокол контроля формируется автоматически. Для этого УД4-ТМ собирает всю необходимую информацию с объекта контроля, сравнивает её с допустимыми пороговыми значениями, которые заложены в его памяти и регламентированы методикой контроля, формирует самостоятельно протокол с указанием выявленных дефектов и их полной характеристикой. И сразу же можно принять окончательное решение о выбраковке участка с опасным дефектом рельса (ОДР) либо переподтвердить его повторно тут же на месте, чтобы оценить возможные риски.

При плановой проверке использование УД4-ТМ значительно сократит время работы дефектоскописта на участке пути и ускорит процесс инспектирования, а также подстрахует при оценке дефекта и облегчит физический труд при передвижении с дефектоскопом.



«Томографик УД4-ТМ»: контроль шейки рельса



«Томографик УД4-ТМ»: контроль подошвы рельса (перья). Ручной контроль без сканера

Вторая значимая особенность прибора – контроль сварных стыков рельс. Среди наиболее распространённых проблем – изломы сварных стыков, связанные с нарушением технологии сварки, климатикой, нагрузками.

Фактически даже при установленной ежемесячной периодичности контроля средствами дефектоскопии изломы рельсов имеют место. Так, среди допущенных изломов на одном из участков пути Восточно-Сибирской дороги после визуального осмотра места излома рельса был обнаружен дефект в шейке рельса. Предварительный анализ дефектограммы вагон-дефектоскопа показал наличие дефекта, но отметка на осмотр не была выдана, что и является причиной пропуска дефектов в сварных стыках рельс. По статистике 50 % изломов происходит именно в сварном стыке. В этом случае для сварных швов применение УД4-ТМ значительно упрощает поиск дефекта (программное обеспечение Томографик 2.4. Контроль стрелочных переводов и сварных стыков рельс (ТИ 07.47-2005, ТИ 07.96-2011)).

УД4-ТМ контролирует регламент проведения процедуры дефектоскопии. В свою очередь подключенный к УД4-ТМ сканер «Слайдер» контролирует координатную зону перемещения ПЭП по исследуемой поверхности. В УД4-ТМ процесс работы дефектоскописта упрощен по сравнению с используемыми приборами дефектоскопии других торговых марок. Но это упрощение не сказывается на ухудшении качества контроля. Оптимальным образом подобранное ПО и аксессуары позволяют не требовать пристальной концентрации внимания дефектоскописта за счет отображения пройденной ПЭП области контроля на мониторе прибора в on-line режиме, а также возможности оценить качество прохода по картинке, отображаемой на экране УД4-ТМ.

Также УД4-ТМ отобразит в протокол недоработку дефектоскописта, если тот не осуществит «прокраску» тестируемой зоны до конца. Таким образом, в протоколе будет видно соблюдение ре-

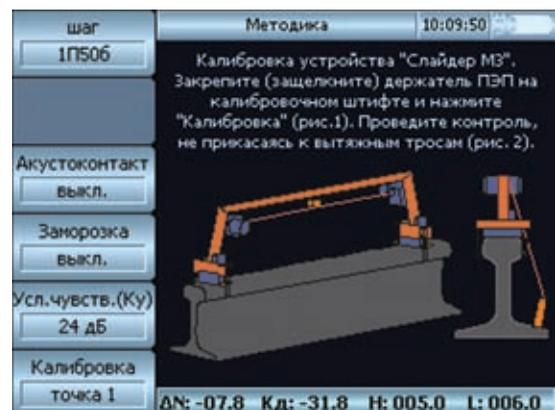


«Томографик УД4-ТМ»: контроль подошвы рельса (перья). Контроль с помощью сканера «Слайдер»

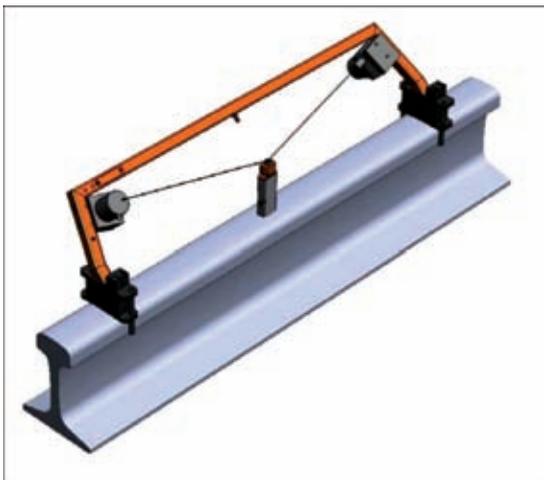
гламента, наличие и места пропусков. Использование сканера позволяет строить 3D изображение в протоколе с учетом покрашенных зон. В этом изображении красным цветом будет отмечен дефект, а так как сканер координатный, то по снятым результатам контроля (условные размеры дефектов выдаются в УД4-ТМ автоматически) можно сравнить показатели с пороговыми значениями допустимых измерений ОДР. Сравнение и расшифровка происходят автоматически, решение выносится в протокол также автоматически. Оценка дефекта происходит на месте измерения.

УД4-ТМ позволяет провести измерение оперативно – быстро установить оборудование, а также быстро его снять, не ограничиваясь во времени работы в «окне». При этом оценка ситуации на месте измерений протоколируется 3D протоколом, автоматически отслеживается акустический контакт, УД4-ТМ строит томографическое изображение А-, В-, С-сканы (т.е. проводит полный анализ дефекта). Поэтому УД4-ТМ исключает недоработку дефектоскописта, либо влияние внешних факторов на пропуск сигнала по его вине.

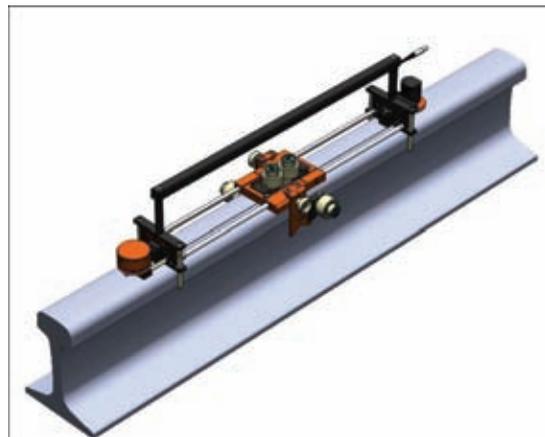
Некоторые компании относят к одной из причин пропуска дефекта т.н. ошибку вторичного контроля, конкретно – отсутствие в портативном оборудовании точки привязки к путевым коор-



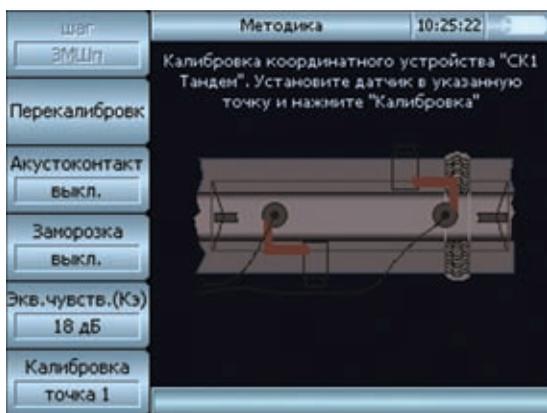
«Томографик УД4-ТМ» со сканером «Слайдер»: калибровка на поверхности рабочего участка рельса



«Томографик УД4-ТМ» со сканером «Слайдер»



«Томографик УД4-ТМ» со сканером «Тандем» на участке рельса (можно оценить размеры сканера и прибора в работе)

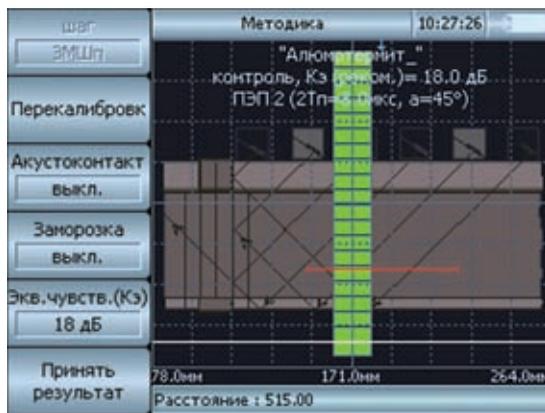


Экранная форма «Томографик УД4-ТМ»: работа со сканером «Тандем» в режиме калибровки

динамам. В УД4-ТМ такая привязка существует уже несколько лет и оправдала свою эффективность на практике. УД4-ТМ оборудован GPS приемником для контроля пути, а в протокол дефектоскописта попадают GPS координаты каждого стыка и таким образом мы отслеживаем реальную привязку на местности.

УД4-ТМ оборудован видеокамерой с автофокусировкой и подсветкой для просмотра местного износа или коррозии подошвы рельса (код 69). При наличии подозрений на дефект по коду есть возможность сделать цифровое фото и включить его в результаты протокола тестирования. Помимо этого, в УД4-ТМ есть возможность с помощью видеокамеры оценить состояние болтовых соединений рельсов, за счет уникальной технологии Video Touch (видеокамера проходит в болтовое отверстие и фиксирует состояние этого отверстия изнутри).

Но контроль сварных стыков рельс и стрелочных переводов был бы неполным без использования второго сканера УД4-ТМ «Тандем». Он обеспечивает дополнительную схему прозвучивания.



Экранная форма интерфейса «Томографик УД4-ТМ» при подключенном устройстве «Тандем»: режим контроля алюмотермитных сварных стыков

«Тандем» и «Слайдер» предназначены для разных видов контроля (об этом более подробно изложено на сайте компании в разделе «Томографик 2.4»).

Теперь функция дефектоскописта при работе с УД4-ТМ сводится к тому, чтобы правильно установить сканеры, выбрать нужную программу из пакета встроенных и нажать кнопку на дефектоскопе.

«Томографик УД4-ТМ» предназначен для работы в разных климатических условиях с объектами разной степени загрязненности.

Таким образом, количество встроенных программ в УД4-ТМ позволяет дефектоскописту осуществить инспекцию участка, будучи полностью независимым и автономно работать с пакетами интегрированных настроек и шаблонов, существенно сокращая время контроля и снижая риски, связанные с пропусками дефектов.

УД4-ТМ – это новая идеология инспектирования, т.н. целевой охват. УД4-ТМ на практике показал высокий потенциал заложенных в приборе возможностей.

Сляднева Н.А., ООО «Вотум»  
www.votum.ru