

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

№ 3, 2004

Издается с января 1989 г.

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

Издатель: Международная ассоциация «Сварка»

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор

Б. Е. ПАТОН

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

Адрес редакции

03680, Украина, г. Киев-150,
ул. Боженко, 11
Институт электросварки
им. Е. О. Патона НАН Украины
Тел.: (044) 261-58-81,
Факс: (044) 268-34-84, 269-26-23
E-mail: journal@paton.kiev.ua
http://www.nas.gov.ua/pwj

Научные редакторы

Н. Г. Белый, А. А. Грузд

Электронная верстка

Л. Н. Герасименко,
И. Р. Наумова, И. В. Петушков

Свидетельство
о государственной регистрации
КВ 4787 от 09.01.2001

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

При перепечатке материалов
ссылка на журнал обязательна

За содержание рекламных
материалов редакция журнала
ответственности не несет

Цена договорная

СОДЕРЖАНИЕ

ИНСТИТУТУ ЭЛЕКТРОСВАРКИ им. Е. О. ПАТОНА
НАН УКРАИНЫ — 70 ЛЕТ

3

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА

- НЕДОСЕКА А. Я., НЕДОСЕКА С. А., ВОЛОШКЕВИЧ И. Г.* Волны деформаций, возникающие при локальной перестройке структуры материалов 8
- ЧАУСОВ Н. Г., НЕДОСЕКА С. А., ПИЛИПЕНКО А. П.* Комплексная оценка поврежденности пластичных материалов при различных режимах нагружения 16
- БОЙЧУК О. И., ЗИРКА А. И., СИЧКО В. М.* Исследование напряженного состояния пластин с дефектами в виде трещин различной глубины 22

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

- ЛОБАНОВ Л. М., ПИВТОРАК В. А., ОЛЕЙНИК Е. М., КИЯНЕЦ И. В.* Методика, технология и аппаратура широкографического неразрушающего контроля материалов и элементов конструкций 25
- НИКИФОРЕНКО Ж., БУЛАВИНОВ А., ЯГЕР В., РОКШТРО Б., КРЕНИНГ М., ЗЙШХОРН К., ЗАУЭР Р.* Метод ЭМА-контроля трубопроводов с изоляционными покрытиями 29
- ЯВОРСЬКИЙ А. В., КИСІЛЬ І. С.* Безконтактный контроль стану ізоляційного покриття гальванічно з'єднаних паралельних промислових нафтогазопроводів 36
- ВЕНГРИНОВИЧ В. Л., ЗОЛОТАРЕВ С. А., ЕВЕРТ У., РЕДМЕР Б., ТИЛЛАК Г.-Р.* Томографическая визуализация и контроль толщины стенок труб по ограниченному рентгеновским данным 41
- ГАРЬКАВЫЙ В. В., КАТАСОНОВ Ю. А.* Ультразвуковой контроль толщины стенок труб в потоке производства 46

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

- БАСОВ Г. Г., МАРКОВ В. Л., КИРЕЕВ А. Н., ВОЛКОВА С. А.* Особенности ультразвукового контроля в радиальном направлении осей колесных пар подвижного состава железных дорог 49

ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ

- Конференция-выставка «НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ — 2004» 51
- III Международная специализированная выставка и конференция «НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ И ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА В ПРОМЫШЛЕННОСТИ» 52
- 5-я Конференция испытательных центров Украины 54
- Украинские дефектоскописты провели конференцию в Турции 55
- Поздравляем Анатолия Яковлевича Недосеку с юбилеем! 57
- ГОРДЕЛИЙ В. И., ЧЕБАН В. И.* К вопросу о сплошной регистрации и документировании результатов контроля рельсов съемными ультразвуковыми дефектоскопами 62

ИЗДАНИЕ ЖУРНАЛА ПОДДЕРЖИВАЮТ:

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



Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики

TECHNICAL DIAGNOSTICS and NON-DESTRUCTIVE TESTING

№ 3, 2004

Founded in January, 1989

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

Publisher: *International Association «Welding»*

EDITORIAL BOARD:

Editor-in-Chief

B. E. PATON

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

Address:

The E. O. Paton Electric
Welding Institute
of the NAS of Ukraine,
11 Bozhenko str., 03680,
Kyiv, Ukraine
Tel.: (38044) 261-58-81,
Fax: (38044) 261-34-03, 269-26-23
E-mail: journal@paton.kiev.ua
http://www.nas.gov.ua/pwj

Scientific editors:

N. G. Bely, A. A. Gruzd

Electron galley:

I. R. Naumova, L. N. Gerasimenko,
I. V. Petushkov

State Registration Certificate
KV 4787 of 09.01.2001

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

CONTENTS

70th anniversary of E.O.Paton Electric Welding Institute 3

TECHNICAL DIAGNOSTICS

NEDOSEKA A. Ya., NEDOSEKA S. A., VOLOSHKEVICH I. G. Deformation
waves, arising at local changes in material structure 8
CHAUSOV N. G., NEDOSEKA S. A., PILIPENKO A. P. Integrated
evaluation of damage of ductile materials under different
loading modes 16
BOICHUK O. I., ZIRKA A. I., SICHKO V. M. Investigation of the stressed state
in plates with cracklike defects in the form of cracks of a different depth 22

NONDESTRUCTIVE TESTING

LOBANOV L. M., PIVTORAK V. A., OLEINIK E. M., KIYANETS I. V.
Procedure, technology and instrumentation of shearographic
non-destructive testing of materials and elements of structures 25
*NIKIFORENKO Zh., BULAVINOV A., YAGER V., ROKSHTRO B.,
KRENING M., EISHHORN K., ZAUER R.* Method of EMA-control of pipelines
with insulation coatings 29
YAVORSKY A. V., KISIL I. S. Contactless control of the condition of insulating
coating in galvanically-coupled parallel industrial oil and gas pipelines 36
*VENGRINOVICH V. L., ZOLOTAREV S. A., EBERT U., REDMER B.,
TILLAK G.-R.* Tomographic visualization and control of pipe wall thickness by
limited X- data 41
GARKAVII V. V., KATASONOV Yu. A. Ultrasonic testing of pipe wall thickness
in the production flow 46

INDUSTRIAL

BASOV G. G., MARKOV V. L., KIREEV A. N., VOLKOVA S. A. Features of ul-
trasonic testing in the radial direction of wheelset axles in railway rolling
stock 49

NEWS

Conference-exhibition «Non-Destructive Testing — 2004» 51
3rd International Specialized Exhibition and Conference «Non-Destructive
Testing and Technical Diagnostics in Industry» 52
5th Conference of Testing Centers of Ukraine 54
Ukrainian flaw detection experts held a conference in Turkey 55
Best greetings to A. Nedoseka on his jubilee! 57
GORDELII V. I., CHEBAN V. I. To the problem of continuous registration and
documenting of the results of inspection of rails using plug-in ultrasonic flaw
detectors 62

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

ИНСТИТУТУ ЭЛЕКТРОСВАРКИ им. Е. О. ПАТОНА НАН УКРАИНЫ — 70 ЛЕТ

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

Е. О. Патон сумел предвосхитить огромные перспективы развития технологии электрической сварки металлов — детища талантливых русских изобретателей Н. Н. Бенардоса и Н. Г. Славянова. Убедительным подтверждением этого научного предвидения есть тот непреложный факт, что сегодня сварка является ведущим технологическим процессом неразъемного соединения металлических и неметаллических материалов в различных условиях и средах, включая космическое пространство и Мировой океан. В этом отражается значительный вклад коллектива института за 70 лет его деятельности.

На первом этапе специалистами института была доказана принципиальная возможность изготовления сварных конструкций, не уступающих по своей прочности и надежности клепаным, а по ряду показателей значительно их превосходящих. Это послужило основой массового применения сварки в дальнейшем. В эти же годы в институте было обосновано научное представление о дуговой сварке как металлургическом процессе, под руководством Е. О. Патона проведены исследования по автоматизации дуговой сварки. К 1940 г. была завершена разработка и начато внедрение на заводах страны высокопроизводительного процесса сварки под флюсом.

Решающее значение приобрела автоматическая сварка под флюсом в годы Великой Отечественной войны. Непосредственно в цехах танкового завода на Урале сотрудники института работали и внедрились технологию автоматической сварки броневой стали, позволившую создать точное производство сварных корпусов танков Т-34 и механизировать сварку другой военной техники. В заводских условиях коллектив института не прекращал научных исследований.

Довоенный и военный этапы в деятельности института — период становления научной школы, убедительным подтверждением авторитета которой явилось присвоение институту в 1945 г. имени Евгения Оскаровича Патона.

В годы восстановления разрушенного войной народного хозяйства усилия коллектива института были направлены на расширение областей применения высокопроизводительной автоматичес-

кой и механизированной сварки под флюсом взамен ручной, на рационализацию сварных конструкций и индустриализацию их производства. Сотрудники института первыми в мире осуществили автоматическую сварку листовых конструкций непосредственно при монтаже.

Расширилось участие специалистов-сварщиков в разработке совместно с металлургами хорошо свариваемых конструкционных сталей для ответственных сварных конструкций и сооружений. Работы этого периода положительно сказались на темпах послевоенного восстановления промышленности, развития современного производства строительных металлоконструкций, производства высоконадежных в сварном исполнении изделий тяжелого, транспортного, химического и энергетического машиностроения.

Решение главной задачи — повышение производительности и уровня механизации сварочных работ — требовало непрерывного расширения в институте исследований по изысканию новых способов и приемов механизированной сварки, естественно, без сокращения работ по увеличению рациональных областей применения дуговой сварки под флюсом. Поиск возможности сварки под флюсом швов, расположенных в различных пространственных положениях, завершился созданием под руководством Е. О. Патона способа принудительного формирования сварного шва, который положил начало механизации дуговой сварки швов на вертикальной плоскости.

12 августа 1953 г. отечественная и мировая наука понесла тяжелую утрату — на 84-м году оборвалась жизнь Евгения Оскаровича Патона, человека, вписавшего яркую страницу в историю отечественной науки и техники. Его ученики и последователи, весь коллектив института достойно продолжили дело, начатое его основателем. С 1953 г. и до настоящего времени директором института является его сын, академик Борис Евгеньевич Патон.

Одним из наиболее значительных достижений института начала 1950-х гг. стало создание новой технологии сварки плавлением металла больших толщин — электрошлаковой, которая в корне изменила производство тяжелых станин, котлов, гидроагрегатов и других уникальных сварно-прокатных, сварно-литых конструкций. Ее применение позволило в значительном диапазоне толщин получить сварные соединения высокого качества.

Позднее совместно с ЦНИИТМаш и другими организациями создан способ сварки в углекислом газе тонкой проволокой, получивший широкое применение в промышленности и обеспечивший значительный рост уровня механизации сварочных работ. Дальнейшим развитием газозащитной сварки плавящимся электродом стали разработка процесса и оборудования для импульсно-дуговой

сварки, сварки в смесях активных и инертных газов. В этой связи следует особо подчеркнуть важность работ по созданию полуавтоматов, которые постепенно вытеснили там, где это возможно и целесообразно, малопроизводительную сварку штучными электродами. Распространение этих видов неразъемных соединений стимулировало развитие неразрушающих методов контроля качества различными физическими методами.

В конце 1950-х гг. в институте активно начались исследования в области электронно-лучевой сварки. Усилия ученых были направлены на исследование физико-металлургических процессов при воздействии мощного (до 100 кВт) острофокусного пучка электронов на толстолистовые (150...200 мм) конструкционные материалы. Особенно важной задачей, с которой институт успешно справился, являлась разработка технологии замыкания кольцевых швов, которая обеспечивала отсутствие корневых дефектов в виде раковин, пор и несплошностей.

Дальнейшим этапом развития лучевой технологии явилось ее применение для целей сварки и резки лазером. Проводятся систематические исследования в области импульсной и непрерывной лазерной сварки. В последнее время специалистами института разработаны гибридные источники нагрева — лазер-дуга, лазер-плазма.

На всех этапах деятельности института особое внимание уделялось исследованию физических, химических и металлургических особенностей сварки металлов. Лаборатории института были оснащены необходимой исследовательской аппаратурой, средствами для механических испытаний, рентгеновской ультразвуковой аппаратурой для проверки качества сварных соединений.

В институте получили развитие исследования по всем основным направлениям сварки давлением — стыковой контактной оплавлением и сопротивлением, точечной сварке, трением, диффузионной сварке.

Изучены физические и технологические особенности новых технологических процессов контактной сварки оплавлением, созданы системы автоматического управления и диагностики качества соединений. На базе новых технологий разработано и освоено производство нескольких поколений специализированных и универсальных машин для контактной стыковой сварки деталей широкого сортамента из низколегированных и высокопрочных сталей с площадью поперечного сечения до 200 тыс. мм², а также сплавов алюминия, титана, хрома, меди. Наиболее массовое применение нашли машины для сварки рельсов различных категорий в полевых и стационарных условиях, машины для сварки труб диаметром от 150 до 1420 мм при строительстве магистральных трубопроводов, установки для сварки элементов конструкций аэрокосмической техники. Оборудование для контактной сварки рельсов экспортируется во многие страны мира.

На основании использования энергии взрыва созданы новые способы сварки, резки, плакирования и обработки сварных соединений. Сварку и резку взрывом можно осуществлять в полевых

условиях, где затруднено применение громоздкого сварочного оборудования.

На протяжении многих лет институт проводит исследования по сварке в космосе. В 1969 г. на борту космического корабля «Союз-6» летчик-космонавт В. Н. Кубасов впервые в мире осуществил уникальный эксперимент по сварке электронным лучом, плазмой и плавящимся электродом на установке «Вулкан», созданной в ИЭС. Так было положено начало космической технологии, имеющей большое значение в программе освоения космического пространства. В 1984 г. был проведен чрезвычайно важный, подготовленный ИЭС, эксперимент на борту орбитальной станции в открытом космосе. Космонавты С. Савицкая и В. Джанибеков впервые в открытом космосе с помощью ручного электронно-лучевого инструмента (УРИ) выполнили процессы сварки, пайки, резки и напыления. Период с 1985 по 2000 гг. характерен ростом объема работ, выполненных в космосе. Продолжались работы по нанесению покрытий и сварке металлов, проведены комплексные эксперименты по раскрытию 12-метровой ферменной конструкции, сопровождавшихся сваркой и пайкой ее отдельных узлов с помощью УРИ, раскрыты две 15-метровые ферменные конструкции, являвшиеся несущей основой для многогоразовых солнечных батарей технологического модуля, пристыкованного к орбитальной станции «Мир».

Параллельно в институте решалась и такая сложная проблема, как механизация дуговой сварки под водой, которая приобрела большое значение в связи с освоением прибрежного шельфа Мирового океана. Специалисты института создали оборудование для механизированной дуговой сварки и резки специальной порошковой проволокой на глубинах до 60 м и успешно развивают исследования по осуществлению сварки на больших глубинах.

Основополагающее значение имеют систематические исследования института в области физико-металлургических особенностей сварки различных металлов и сплавов плавлением: изучены процессы кристаллизации металла шва, установлена природа его структурной и химической неоднородности, раскрыт механизм поро- и трещинообразования, найдены методы и средства их обнаружения. Результаты этих исследований во многом являются серьезной теоретической базой для создания и совершенствования различного типа сварочных и наплавочных материалов, технологий контроля качества.

Интенсивное развитие современной техники сопровождается постоянным расширением сортамента конструкционных металлов и сплавов для сварных конструкций. В ходе исследований по изучению процессов, протекающих в сварочной ванне, созданы новые сварочные материалы, электроды, порошковые проволоки, флюсы, газовые смеси, а также приборы для контроля их качества.

В связи с возрастающими объемами применения пластмасс как конструкционного материала

в институте развернуты исследования по их сварке в первую очередь по сварке труб из пластмасс. К этому направлению примыкают работы по склеиванию.

Экспериментально-теоретические исследования и научные разработки в области прочности сварных соединений и конструкций представляют традиционные направления в тематике института, начало которым было положено Е. О. Патонам. Сегодня эти исследования носят многоплановый характер, для их проведения используется современное лабораторно-испытательное оборудование в сочетании с проведением уникальных натурных экспериментов и компьютерного моделирования. Это позволяет разрабатывать новые эффективные методы повышения надежности ответственных инженерных сооружений при статическом и циклическом нагружении, а также устанавливать расчетно-конструктивные принципы обеспечения заданных служебных свойств сварных соединений. Проблема создания надежных сварных конструкций охватывает также вопросы выбора материалов, рациональных конструктивных решений, технологии изготовления и монтажа, снижения металлоемкости, которые институт успешно решает в содружестве со многими отраслевыми организациями и предприятиями.

В последнее время ведутся интенсивные работы по повышению надежности, долговечности и ресурса сварных конструкций, а также созданию эффективных методов их диагностики. Техническая диагностика начинает все более широко использоваться для обеспечения безопасной эксплуатации конструкций. В связи с эффективностью диагностических методов их развитие происходит быстрыми темпами, с внедрением высоких технологий контроля на базе наиболее передовой цифровой измерительной и вычислительной техники, современного программного обеспечения.

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

Сегодня системы непрерывного мониторинга, разработанные в институте, успешно работают на ряде нефтехимических производств с использо-

ванием связи по системе Интернет. Это позволяет строить контрольные и управляющие системы, которые дают возможность независимо от места расположения эксплуатирующейся конструкции наблюдать за ее состоянием из единого специализированного диагностического центра.

Внедрение средств диагностики в производство и подготовка соответствующих кадров требуют совершенствования нормативной базы. За последние годы институтом в тесном сотрудничестве с Госстандартом и Госнадзором охраны труда Украины создан ряд отраслевых и государственных стандартов, регламентирующих процедуру технической диагностики, оснащение диагностических лабораторий и вопросы обучения и сертификации специалистов. В сложившейся ситуации всевозрастающую роль приобретает подготовка специалистов, умеющих применять сложную диагностическую аппаратуру и системы. Эти вопросы успешно решают созданные совместно с Госнадзором охраны труда Украины специализированные курсы по подготовке специалистов в данной области, на которых начиная с 1994 г. подготовлено более 1500 специалистов.

Работы института не ограничиваются исследованиями в области металлических материалов. Сотрудников института интересовали и проблемы сварки полимерных материалов и изделий из них. В последние годы появилось еще одно направление — электросварка мягких тканей живых организмов. Результаты этих исследований нашли применение в практике хирургических операций.

С начала 1950-х гг. по инициативе акад. Б. Е. Патона в институте развернуты поисковые исследования и экспериментальные разработки по выявлению возможности использования сварочных источников нагрева для получения металлов и сплавов особо высокого качества и надежности, на основе которых сформировалось второе основное научное направление в деятельности института: специальная электрометаллургия. Усилия и успехи коллектива в этой новой области обеспечили заметное продвижение в развитии современной качественной металлургии.

К новым электрометаллургическим процессам в первую очередь относится электрошлаковый переплав расходуемого электрода в водоохлаждаемую изложницу. Фундаментальные исследования сущности электрошлакового процесса, его физико-химических, металлургических и электротехнических особенностей обеспечили передовые позиции института в разработке и применении электрошлаковой технологии, наплавки, литья, подпитки и др.

В последние годы в институте выполнен комплекс научно-исследовательских работ, послуживших основой для разработки нового поколения электрошлаковых технологий, основанных на получении слитков и заготовок непосредственно из жидкого металла без переплава расходуемых электродов. Эти технологии запатентованы в Украине и за рубежом и реализованы в промышленности. В частности, на Ново-Краматорском ма-

шиностроительном заводе на основе этих технологий создан уникальный комплекс по производству биметаллических прокатных валков мирового уровня.

В институте созданы еще две электрометаллургические технологии: плазменно-дуговая и электронно-лучевая. Разработка техники и технологии этих переплавных процессов велась параллельно с фундаментальными исследованиями физико-металлургических особенностей рафинирования в контролируемой атмосфере или вакууме и процессов кристаллизации сталей, сложнолегированных сплавов, цветных и тугоплавких металлов.

Плазменно-дуговой переплав, благодаря серьезным исследованиям высокотемпературных систем «газ-металл», открыл широкие возможности производства нового класса конструкционных материалов — высокоазотистых сталей. А создание мощных металлургических плазмотронов позволило институту выйти в большую металлургию — были разработаны новые конструкции установок типа «ковш-печь» емкостью до 100 т. Чистота металла, полученного в этих установках, не уступает по качеству электрошлаковому.

Совместными усилиями ученых института, отраслевых научных учреждений и производственников создана совершенная электронно-лучевая техника, а технология электронно-лучевой плавки в вакууме стала незаменимым процессом получения особо качественных материалов в металлургии и машиностроении. Работы в этом направлении в настоящее время сконцентрированы в созданном при институте научно-инженерном центре «Титан», который выполняет заказы как для предприятий Украины, так и для зарубежных компаний.

Исследования процесса испарения в вакууме металлических и неметаллических материалов и их последующей конденсации как основы паровфазной металлургии открыли возможность для получения покрытий из различных материалов, включая жаростойкие, тугоплавкие и композиционные, позволили в широких пределах регулировать состав, структуру и свойства осажденных слоев. Толщина наносимых покрытий в зависимости от назначения регулируется от десятка микрон до нескольких миллиметров.

Гордостью ИЭС им. Е. О. Патона является создание технологии сварки и контроля качества труб магистральных газопроводов, которая внедрена на многих заводах Украины и России.

В начале 1980-х гг. в институте формируется новое научное направление — комплексные исследования по созданию новых и совершенствованию существующих технологических процессов термического нанесения защитных и износостойких покрытий. В настоящее время институт развивает практически все современные процессы нанесения защитных и упрочняющих покрытий. Разработаны технология и установки для плазменно-дугового напыления износостойких покрытий, а также установки для детонационного на-

пыления, которые могут эксплуатироваться с применением различных рабочих газов (ацетилена, пропана, водорода).

На всех этапах деятельности института одной из его главных задач является разработка оборудования для механизации процессов сварки и наплавки с целью замены ручного труда сварщика. Основные принципы построения сварочных установок, заложенные еще Е. О. Патоновым, плодотворно развиваются коллективом конструкторов ОКБ института с учетом новых тенденций развития сварочного и металлургического производства.

Большое внимание в институте уделяется созданию и широкому применению автоматического контроля качества и управления технологическими процессами сварки, спецэлектрометаллургии и напыления с использованием современной вычислительной техники. Основой для этих разработок послужили фундаментальные исследования конкретных технологических процессов как объектов управления. Первые исследования в этом направлении были начаты акад. Б. Е. Патоном еще во время Великой Отечественной войны и успешно развиваются под его непосредственным руководством в настоящее время.

Значителен вклад в творческие успехи коллектива института тех научных подразделений и сотрудников, которые ведут математические исследования, создают новые методики современных физических и химических исследований качества, разрабатывают информационные системы, банки данных и экспертные системы, занимаются прогнозированием и систематическим анализом экономических аспектов развития сварочной науки и техники.

Благодаря сочетанию целенаправленных фундаментальных теоретических исследований с инженерно-прикладными разработками, тесным творческим связям с промышленными предприятиями в реализации технологических новшеств институт за прошедшие 70 лет своей деятельности превратился в крупнейший в стране и мире научно-исследовательский центр в области сварки и родственных технологий.

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

Деятельность института и хозяйственных подразделений строго координирована и полностью ориентирована на совместное решение задач по основным научным направлениям.

Активное и непосредственное участие ученых института в практической реализации своих разработок обогащает их как работников академической науки в проведении фундаментальных ис-

следований и поисковых разработок в области сварки и смежных процессов, а также спецэлектрометаллургии, имеющих межотраслевое значение. За прошедшие 70 лет институт доказал жизнеспособность ориентации на целенаправленные фундаментальные исследования, которые повышают значимость их результатов в последующих разработках. В активе ученых института уникальные результаты познания физики дугового разряда и низкотемпературной плазмы, свойств мощных остросфокусированных пучков электронов, природы плавления, испарения, кристаллизации и конденсации металлов, физико-химических и теплофизических процессов сварки и рафинирующих переплавов, прочности и надежности сварных соединений и конструкций.

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

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

Реализация перспективных научных разработок и инновационных проектов института осуществляется также через созданный при ИЭС «Технологический парк», в состав которого входят свыше 30 научных организаций, предприятий, инженерных центров и опытных заводов, специализирующихся в области сварки и родственных технологий. Среди них такие известные производители сварочного оборудования, как «КЗЭСО» и «СЭЛМА».

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

Подготовка инженерных кадров ведется институтом совместно с НТУУ «Киевский политехнический институт». Ученые института читают студентам обзорные курсы и руководят целевой подготовкой магистров. Научно-производственную и дипломную практику студенты проходят в научных отделах и лабораториях института.

Подготовка инженеров-физиков и математиков со специализацией в области сварки и спецэлек-

тромаметаллургии осуществляется на кафедре физической металлургии и материаловедения Киевского отделения МФТИ, организованной на базе ИЭС.

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

На базе института, имеющего уникальный научный и кадровый потенциал, хорошо оснащенные испытательные лаборатории создан центр по сертификации продукции сварочного производства, который аккредитован как орган по сертификации под названием «СЕПРОЗ». В настоящее время центр проводит работу по совершенствованию украинской системы сертификации в соответствии с международными нормами и правилами.

Институт поддерживает широкие международные связи с ведущими центрами по сварке в Европе, США, Азии, является членом Международного института сварки и Европейской сварочной федерации. На базе института действует Межгосударственный научный совет по сварке и родственным технологиям стран СНГ, Международная ассоциация «Сварка» и Международное объединение «Интерм», Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики, которое входит в состав Европейской федерации EFNDT и Всемирного конгресса ICNDT.

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

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

За прошедшие 70 лет коллектив института прошел славный путь. Сегодня — это коллектив единомышленников, приумножающий успехи Патоновской научной школы, имеющей мировое признание. Институт растет и развивается, совершенствуется его структура и система управления — все направлено на дальнейшее развитие сварки и родственных процессов, а также решение базовых проблем экономики промышленного производства.



ВОЛНЫ ДЕФОРМАЦИЙ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ ЛОКАЛЬНОЙ ПЕРЕСТРОЙКЕ СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛОВ

А. Я. НЕДОСЕКА, С. А. НЕДОСЕКА, И. Г. ВОЛОШКЕВИЧ

В настоящее время отсутствуют теоретические основы метрологической аттестации метода акустической эмиссии (АЭ). Это в сильной мере сдерживает стандартизацию методик неразрушающего контроля с помощью АЭ метода, создание взаимозаменяемой АЭ аппаратуры, разработку универсальных программных продуктов, прогнозирующих возможное разрушение конструкций. Первым шагом на пути создания унифицированных диагностических АЭ средств контроля должна стать стандартизация метода АЭ. Для того, чтобы начать эту работу, необходима разработка достаточно точной и в то же время приемлемой для практических расчетов теории распространения волн деформаций от источника АЭ возмущения, призванная аналитически описать процессы переноса АЭ информации распространяющимися волнами.

At present there are no theoretical fundamentals for procedural certification of the method of acoustic emission (AE). This largely restrains standardization of NDT procedures using AE method, development of irreplaceable AE instrumentation, development of versatile software products, forecasting the possible failure of structures. A standardization of AE method should be the first step to development of unified diagnostic AE means of control. In order to start this work, it is necessary to develop a sufficiently accurate and at the same time acceptable procedure for practical calculations of the theory of deformation wave propagation from a source of AE disturbance, aimed at analytical description of the processes of AE data transfer by propagating waves. In this study the issue of such a procedure development is considered for a wave problem in a plate which developed a microdefect between its surfaces.

Введение. Вопросами расчета волновых процессов, возникающих при локальных перестройках структуры материалов, начали заниматься в 1960–1970-х гг. [6–8]. В связи с тем, что мощность вычислительных средств была невелика, большие усилия науки того времени были потрачены на выбор приемлемых методов расчета. Внимание аналитиков привлекла теория обобщенного луча, применявшаяся для расчета сейсмических процессов в геофизических задачах. Решение упрощали, поскольку не было необходимости решать динамическую задачу теории упругости в общей постановке. В этой теории упругие волны, распространяющиеся по различным траекториям вследствие многократных отражений и преломлений, рассчитывали по геометрическим траекториям в зависимости от точки, в которой требовалось получить результат расчета. Общее значение воздействия волны на материал подсчитывали путем интегрирования по лучу. Для решения этой задачи вводилось также допущение, что двигающаяся волна может быть представлена в виде конечной суммы плоских волн, одновременно проходящих через источник во всех направлениях. Каждой плоской волне приписывалась своя амплитуда. Плоские волны суммировались во всех направлениях путем интегрирования по параметру. Суммирование прямых, отраженных и преломленных плоских волн проводилось по всему их пути вплоть до точки, в которой требовалось определить результат их действия (например, перемещение поверхности пластины). Упрощение общей теории привело, однако, к сильному загромождению расчетов. Исследования волновых процессов с применением теории обобщенного луча позволило решить нескольких частных задач в сильно упрощенном варианте [7, 8]. Дальнейшие разработки в этом направлении показали необходимость решения общей задачи теории упругости. Попытки решения задачи численными методами сдерживались также недостаточно высокой для решения таких задач производительностью вычислительных средств. Однако развитие технологий контроля состояния материалов с применением акустико-эмиссионного метода настоятельно требует создания надежного и приемлемого для практики способа расчета перемещений поверхности пластин при распространении упругой волны, возникшей от мгновенного сосредоточенного источника.

Учитывая специфические требования к метрологии метода АЭ, следует признать необходимым создание универсального варианта расчета, при котором с использованием современных возможностей вычислительной техники и аналитических методов решения динамической задачи теории упругости должны быть получены решения волновых уравнений с любой комбинацией параметров упругой волны. В данной работе вопрос разработки такой методики рассмотрен применительно к волновой задаче в пластине с возникшим микродефектом между ее поверхностями.

© А. Я. Недосека, С. А. Недосека, И. Г. Волошкевич, 2004

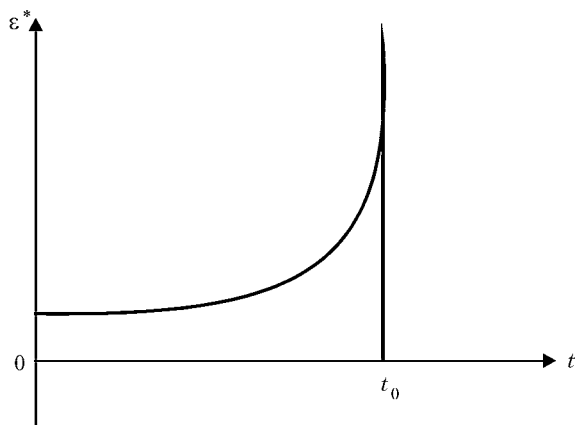


Рис. 1. Схема изменения деформации ε^* в районе возникновения микронесплошности

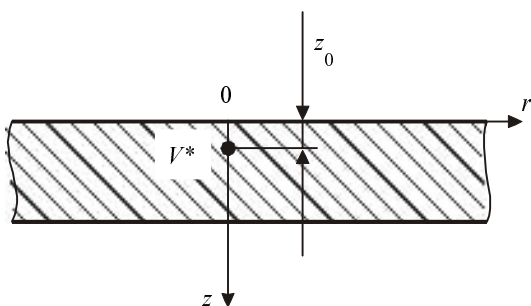


Рис. 2. Схема расчетной модели

Решение волновой задачи. Механизм возникновения и развития во времени локальной деформации внутри пластины можно представить графиком, изображенным на рис. 1.

Деформация ε^* монотонно развивается от исходного состояния до тех пор, пока в момент времени t_0 в наиболее слабом месте материала, например, в точке $(0, z_0)$, не образуется разрыв или внезапное смещение, характеризующееся быстрым сбросом деформации в этом месте до нуля или до некоторого минимального на данный период времени значения (рис. 2). На графике, представленном на рис. 1, интерес представляет лишь момент времени t_0 , когда деформация скачкообразно изменяет свое значение. Процесс деформирования материала до момента t_0 – монотонный. Динамика возникает в момент t_0 и может быть описана импульсной функцией $\delta_+(t - t_0)$. Если переместить начало координат по времени в точку t_0 , то распределение внезапно изменившегося на глубине z_0 от поверхности пластины объема V^* по осям координат и времени можно представить в виде произведения δ_+ -функций:

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

Учитывая изложенное, рассмотрим пластину толщиной δ , в которой на глубине z_0 возник источник, описанный выражением (1). Предположим, что источник – дефект структуры – возник в виде микровзрыва объемом V^* в течение очень малого промежутка времени τ^* с симметричным во всех направлениях движением АЭ волны. Тогда уравнения, описывающие распространение упругих волн в пластине, можно записать в виде

$$\begin{aligned} \nabla^2 \varphi - \frac{1}{C_1^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} &= -\frac{1+\nu}{1-\nu} V^* \tau^* \frac{\delta_+(r)}{2\pi r} \delta_+(z - z_0) \delta(t), \\ \nabla^2 \psi - \frac{1}{C_2^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Решим систему (2) в предположении, что тело ограничено с двух сторон и на границе выполнены условия

$$\sigma_z = \tau_{rz} = 0 \quad \text{при } z = 0, \delta.$$

При этом начальные условия задачи определяются функцией $\delta_+(t)$, что указывает на то, что при $t = +0$ возник и исчез источник излучения.

Применив преобразование Лапласа по времени t (с параметром p) и преобразование Ханкеля по координате r (с параметром α), получим:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \bar{\varphi}}{\partial z^2} - \left(\alpha^2 + \frac{p^2}{C_1^2} \right) \bar{\varphi} &= -\frac{1+\nu}{1-\nu} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{V^*}{2\pi} \delta_+(z - z_0), \\ \frac{\partial^2 \bar{\psi}}{\partial z^2} - \left(\alpha^2 + \frac{p^2}{C_2^2} \right) \bar{\psi} &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$



Граничные условия примут вид

$$\begin{aligned}\tau_{rz} &= G \frac{\partial}{\partial r} \left(2 \frac{\partial \Phi}{\partial z} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 \Psi}{\partial r^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial r} \right) = 0, \\ \sigma_z &= -2G \left[\frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} - \frac{1}{2C_2^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial^2 \Psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial r} \right) \right] = 0\end{aligned}\quad \text{при } z = 0, \delta,$$

и после преобразований

$$\begin{aligned}\frac{1}{G} \tau_{rz} &= 2 \frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial z} + \frac{\partial^2 \bar{\Psi}}{\partial z^2} + \alpha^2 \bar{\Psi} = 0, \\ \frac{1}{G} \sigma_z &= \left(\frac{p^2}{2C_2^2} + \alpha^2 \right) \bar{\Phi} + \alpha^2 \frac{\partial \bar{\Psi}}{\partial z} = 0\end{aligned}\quad \text{при } z = 0, \delta. \quad (4)$$

Решение граничной задачи (3), (4) будем искать в виде

$$\begin{aligned}\bar{\Phi} &= C \exp(z\beta_1) + D \exp(-z\beta_1) + \overbrace{\frac{P_1}{\beta_1} \exp(-|z - z_0| \beta_1)}^{\bar{\Phi}_2}, \\ \bar{\Psi} &= A \exp(-z\beta_2) + B \exp(z\beta_2),\end{aligned} \quad (5)$$

где

$$P_1 = \frac{1 + \nu}{1 - \nu} \frac{V^* \tau^*}{2\pi}, \quad \beta_1 = \sqrt{\alpha^2 + \frac{p^2}{C_1^2}}, \quad \beta_2 = \sqrt{\alpha^2 + \frac{p^2}{C_2^2}}.$$

Подставив значения функций $\bar{\Phi}$ и $\bar{\Psi}$ из уравнений (5) в уравнения (4), получим систему уравнений для определения произвольных постоянных A, B, C, D . Приравняв определитель системы нулю, получим спектральное уравнение, которое после некоторых преобразований примет вид

$$4\gamma_1\gamma_2(1-\gamma_2^2)\left(1-\frac{C}{2C_2^2}\right)\left[\operatorname{ch}(\alpha\delta\gamma_1)\cos(\alpha\delta\gamma_2)-1\right]+\left[4\gamma_1^2\gamma_2^2-(1-\gamma_2^2)^2\left(1-\frac{C}{2C_2^2}\right)^2\right]\operatorname{sh}(\alpha\delta\gamma_1)\sin(\alpha\delta\gamma_2)=0, \quad (6)$$

где

$$\gamma_1 = \sqrt{1 - \frac{C^2}{C_1^2}}, \quad \gamma_2 = \sqrt{\frac{C^2}{C_2^2} - 1}, \quad V^* = \frac{4}{3} \pi R_0^3 \tau^*.$$

Перемещения поверхности пластины ($z = 0$) в преобразованном виде будут

$$\bar{w} = \frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial z} + \alpha^2 \bar{\Psi} = \overbrace{\frac{C_1}{\Delta} \beta_1 \exp(\beta_1 z) - \frac{D_1}{\Delta} \beta_1 \exp(-\beta_1 z) + \alpha^2 \left[\frac{A_1}{\Delta} \exp(-\beta_2 z) + \frac{B_1}{\Delta} \exp(\beta_2 z) \right]}^{\bar{w}_1} + \overbrace{P_1 \exp[-(z_0 - z)\beta_1]}^{\bar{w}_2}. \quad (7)$$

После выполнения обратных преобразований для w_1 будем иметь:



$$\begin{aligned}
 w_1 = & - \int_0^{\infty} \frac{1+v}{1-v} \frac{4R_0^3}{3} \gamma_1 \gamma_2 \left(\frac{C}{C_2} \right) \frac{\alpha^2 (C_2 t_0) \sin \left(\alpha \frac{C}{C_2} C_2 t \right)}{\Delta_2'} \times \\
 & \times \left\{ 16 \gamma_1 \gamma_2 (1 - \gamma_2^2) [\operatorname{ch}(\alpha \gamma_1 z_0) - \operatorname{ch}[\alpha \gamma_1 (\delta - z_0)]] \cos(\alpha \gamma_2 \delta) \right\} - \\
 & - 16 \gamma_1^2 \gamma_2^2 e^{-\alpha \gamma_1 z_0} \operatorname{sh}(\alpha \gamma_1 \delta) \sin(\alpha \gamma_2 \delta) + 4(1 - \gamma_2^2)^3 \operatorname{sh}[\alpha \gamma_1 (\delta - z_0)] \sin(\alpha \gamma_2 \delta) + \\
 & + 8 \gamma_1 \gamma_2 (1 - \gamma_2^2)^2 \operatorname{sh}(\alpha \gamma_1 z_0) [e^{-\alpha \gamma_1 \delta} \cos(\alpha \gamma_2 \delta) - 1] + \\
 & + (1 - \gamma_2^2)^4 [e^{-\alpha \gamma_1 (\delta - z_0)} - e^{-\alpha \gamma_1 z_0} \operatorname{ch}(\alpha \gamma_1 \delta)] \sin(\alpha \gamma_2 \delta) \Big\} J_0(\alpha r) d\alpha,
 \end{aligned} \quad (8)$$

где

$$\begin{aligned}
 \Delta_2' = & 8 \left\{ \gamma_1^2 - \gamma_2^2 + 2\gamma_2^4 - \gamma_2^6 - 4\gamma_1^2 \gamma_2^2 - 3\gamma_1^2 \gamma_2^4 + 6\gamma_1^2 \gamma_2^6 \right\} [\operatorname{ch}(\alpha \delta \gamma_1) \cos(\alpha \delta \gamma_2) - 1] + \\
 & + 8 \left\{ \gamma_1 \gamma_2 + 4\gamma_1^3 \gamma_2 - 6\gamma_1 \gamma_2^3 + 2\gamma_1 \gamma_2^5 - \gamma_1 \gamma_2^7 + 8\gamma_1^3 \gamma_2^3 \right\} \operatorname{sh}(\alpha \delta \gamma_1) \sin(\alpha \delta \gamma_2) - \\
 & - \alpha \delta \left\{ \gamma_1 + 5\gamma_1 \gamma_2^2 - 14\gamma_1 \gamma_2^4 + 10\gamma_1 \gamma_2^6 - 3\gamma_1 \gamma_2^8 + \gamma_1 \gamma_2^{10} - 24\gamma_1^3 \gamma_2^2 - 8\gamma_1^3 \gamma_2^6 \right\} \operatorname{sh}(\alpha \delta \gamma_1) \cos(\alpha \delta \gamma_2) - \\
 & - \alpha \delta \left\{ 9\gamma_1^2 \gamma_2 + 4\gamma_1^2 \gamma_2^3 - 2\gamma_1^2 \gamma_2^5 + 4\gamma_1^2 \gamma_2^7 + \gamma_1^2 \gamma_2^9 - 16\gamma_1^4 \gamma_2^3 - \gamma_2 + 4\gamma_2^3 - 6\gamma_2^5 + 4\gamma_2^7 - \gamma_2^9 \right\} \times \\
 & \times \operatorname{ch}(\alpha \delta \gamma_1) \sin(\alpha \delta \gamma_2).
 \end{aligned}$$

Обратное преобразование Лапласа выполним по таблицам интегральных преобразований [24, стр.222] сначала для функции $\overline{\Phi_2}$, а затем для w_2 :

$$\begin{aligned}
 \overline{\Phi_2} = & \frac{P_1 \exp \left[-(z_0 - z) \sqrt{\alpha^2 + \frac{p^2}{C_1^2}} \right]}{\sqrt{\alpha^2 + \frac{p^2}{C_1^2}}} = P_1 \frac{\exp \left(-\frac{z_0 - z}{C_1} \sqrt{\alpha^2 C_1^2 + p^2} \right)}{\frac{1}{C_1} \sqrt{\alpha^2 C_1^2 + p^2}} \Rightarrow \\
 \Rightarrow \overline{\Phi_2} = & P_1 C_1 J_0 \left[\alpha C_1 \sqrt{t^2 - \left(\frac{z_0 - z}{C_1} \right)^2} \right] = P_1 C_1 J_0 \left[\alpha \sqrt{C_1^2 t^2 - (z_0 - z)^2} \right], \\
 \overline{w_2} = & \frac{\partial \overline{\Phi_2}}{\partial z} = -\frac{\alpha P_1 C_1 (z_0 - z)}{\sqrt{(C_1 t)^2 - (z_0 - z)^2}} J_1 \left[\alpha \sqrt{(C_1 t)^2 - (z_0 - z)^2} \right].
 \end{aligned}$$

Выполнив обратное преобразование Ханкеля, при $z = 0$ получим:

$$w_2 = -\frac{P_1 C_1 z_0}{\sqrt{(C_1 t)^2 - z_0^2}} \int_0^{\infty} \alpha^2 J_0(\alpha r) J_1 \left[\alpha \sqrt{(C_1 t)^2 - z_0^2} \right] d\alpha.$$

Для вычисления интеграла в w_2 вначале найдем неопределенный интеграл

$$- \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \alpha^2 J_0(\alpha r) J_1 \left[\alpha \sqrt{(C_1 t)^2 - z_0^2} \right] d\alpha db = \int_0^{\infty} \alpha J_0(\alpha r) J_0 \left[\alpha \sqrt{(C_1 t)^2 - z_0^2} \right] d\alpha = \frac{\delta_+(r - b)}{r}.$$

Выполнив дифференцирование по b и заменив функцию δ_+ ее приближенным значением, вернемся к функции w_2 :



$$\begin{aligned}
 w_2 &= \frac{1+v}{1-v} \frac{1}{2\pi} \frac{V^* \tau^* C_1 z_0}{\sqrt{(C_1 t)^2 - z_0^2}} \frac{\partial}{\partial b} [\delta_+(r-b)] \approx \\
 &\approx \frac{1+v}{1-v} \frac{1}{2\pi r} \frac{V^* \tau^* C_1 z_0}{\sqrt{(C_1 t)^2 - z_0^2}} 2m^3 (r-b) \exp[-m^2 (r-b)^2] \Rightarrow \\
 \Rightarrow w_2 &\approx \frac{1+v}{1-v} \frac{V^* \tau^*}{\pi r} \frac{C_1 z_0 m^3 \left(r - \sqrt{(C_1 t)^2 - z_0^2} \right)}{\sqrt{(C_1 t)^2 - z_0^2}} \exp \left[-m^2 \left(r - \sqrt{(C_1 t)^2 - z_0^2} \right)^2 \right] = \\
 &= \frac{1+v}{1-v} \frac{V^* \tau^*}{\pi} \frac{C_2 z_0 m^3 (r - C_1 t)}{C_2 t r} \exp[-m^2 (r - C_1 t)^2].
 \end{aligned} \tag{9}$$

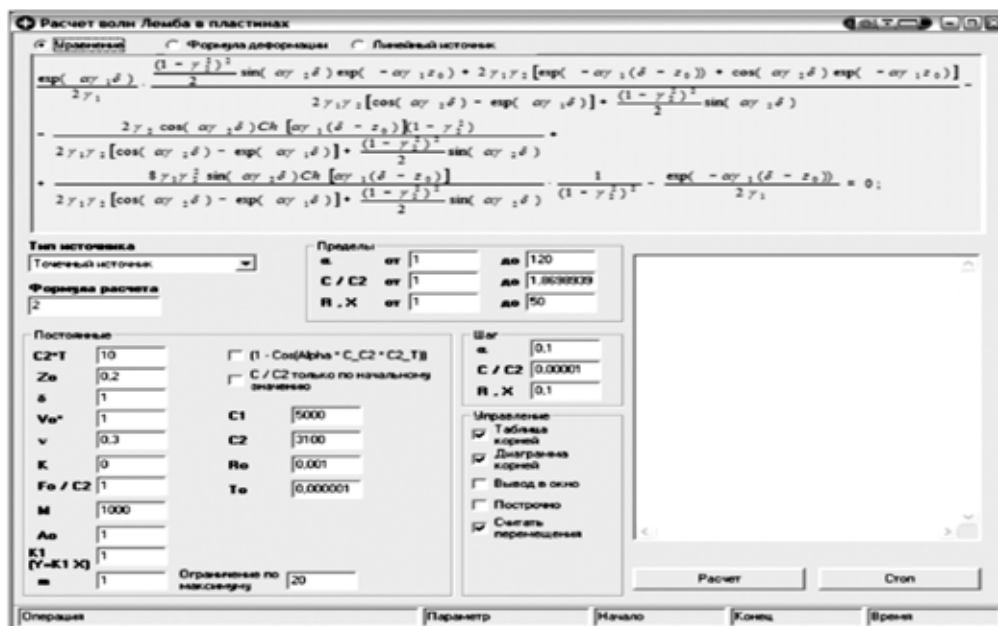
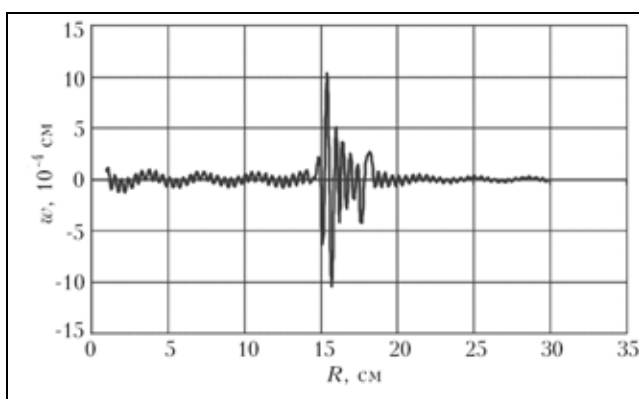
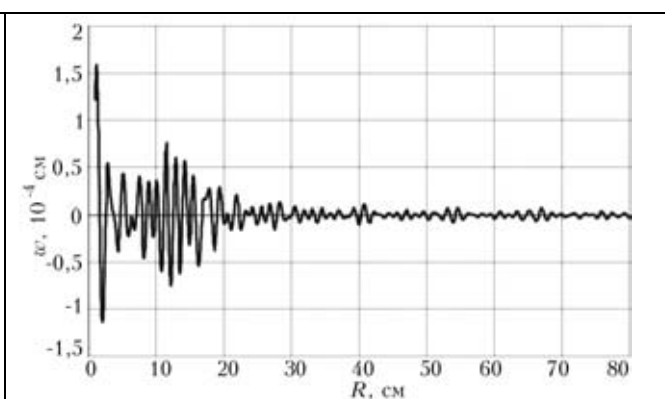


Рис. 3. Окно программы расчета волновых уравнений для Microsoft Windows

Рис. 4. Движение АЭ волны в пластине толщиной 2 мм ($C_2 t = 10$ см в полосе волновых чисел 1...14 1/см)Рис. 5. АЭ волна в пластине толщиной 10 мм ($C_2 t = 10$ см в полосе волновых чисел 1...5 1/см)

Последнее выражение получено для больших значений $C_1 t$. Коэффициент m характеризует интенсивность нарастания и спада фронта продольной волны, передвигающейся со скоростью C_1 . Следует отметить, что волна, имеющая свойства δ -функции, представляет собой острый бесконечно большой по амплитуде импульс. Естественно, зафиксировать его обычными приборами акустической эмиссии не представляется возможным. В то же время, необходимо иметь в виду, что дефекты,



имеющие конечную величину активной поверхности, будут генерировать конечные значения амплитуды с конечным временем действия. В наших расчетах были использованы экспериментальные данные непосредственного измерения амплитуд акустической эмиссии. При этом полученные отношения между продольными и поперечными волнами были использованы при построении функции w_2^* . Окончательное выражение для расчета перемещений поверхности пластины, вызванные действием распространяющейся волны, будет состоять из суммы двух перемещений w_1 (8) и w_2 (9).

Численное решение и результаты расчетов. Для решения интегральных уравнений типа (8) следует применять численные методы. С учетом того, что подынтегральная функция является быстро осциллирующей и содержит функцию Бесселя нулевого порядка, также представляющую собой интеграл, был разработан ряд методов по оптимизации расчетов. В частности, для интегрирования использован известный метод трапеций, а для функции Бесселя при определенных условиях выполнена замена интеграла через элементарные функции. Учитывая большую величину экспонент с положительным показателем в знаменателе и малость экспонент с отрицательным показателем в числителе, после анализа также вводили соответствующие ограничения и замены.

Программирование проведено в рамках объектно-ориентированной модели (рис. 3), что позволило обеспечить быструю и качественную отладку функционирования структур типа связанных списков, примененных для сохранения результатов вычисления корней спектральных уравнений и значений подынтегральных функций и самих интегралов.

Численный расчет позволил получить ряд важных результатов, имеющих практическое значение.

Рассмотрим некоторые примеры движения упругой АЭ волны в пластинах бесконечных размеров толщиной 0,2 и 1 см.

При измерении сигналов акустической эмиссии применяют резонансные датчики на основе пьезокерамики, имеющие вполне определенную пропускную способность по частоте. В экспериментах, проведенных в Институте электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, применяли АЭ датчики, пропускающие АЭ волны в диапазоне 50...500 кГц. Поэтому для сопоставления с данными эксперимента аналитические и численные расчеты выполняли в этом же диапазоне. В терминах волновых чисел α (1/см), этот диапазон примет следующее значение:

$$\alpha = \frac{2\pi f}{C} = 2\pi \frac{50 \dots 500}{C_2 \dots C_1} \cdot 10^3 = 1 \dots 5 \text{ 1/см.}$$

Для получения w интегрирование выражения (8) будем вести в этих пределах. Для пластины толщиной 2 мм получим амплитудную характеристику волны, представленную на рис. 4.

Для пластины толщиной 10 мм будем иметь несколько другое амплитудное распределение, представленное на рис. 5.

Рассматривая графики распространения акустических волн, представленных на рис. 4 и 5, можно заметить, что в обоих случаях отсутствует явно выраженный единственный пик амплитуды волны. Имеется набор волн, двигающихся с различными скоростями по поверхности пластин.

В то же время видна четкая локализация группы волн в районе 15...18 см в пластине толщиной 2 мм и 1...18 см для пластины толщиной 10 мм.* Физические эксперименты, проведенные на реальных металлических пластинах толщиной 2 мм (рис. 6, вклейка) дают примерно ту же картину, что и расчет. Данную особенность хорошо иллюстрируют спектральные характеристики волн, представленные на рис. 7 и 8 (вклейка). Особенно наглядное представление сказанному дает график на рис. 8.

* Данные отношений между амплитудами продольной и поперечной волн были получены при обработке результатов эксперимента с генерированием упругих волн ударом стальной проволоки диаметром 0,4 мм по поверхности пластины толщиной 2 мм изготовленной из алюминий-магниевого сплава АМг6. Для приема акустических волн использовали резонансные датчики на основе пьезокерамики и лучевой осциллограф. Частотный диапазон датчиков составлял 50...500 КГц. Среднее значение отношения амплитуд для серии экспериментов из 10 проб составило 1:3. Эксперименты были выполнены В.И. Калемановым.

** Более толстые пластины вызывают серьезные трудности при расчетах перемещений w . Причина заключается в медленной сходимости достаточно сложной и сильно осциллирующей подынтегральной функции в формуле (8). Причем, число осцилляций существенно возрастает с увеличением толщины пластины. Поэтому результаты расчета, представленные на рис. 5, показывают незначительные амплитуды сигнала акустической эмиссии за пределами рассматриваемого диапазона, который ограничивает распространение АЭ волн значением скорости продольной волны.



График построен для волновых чисел от 0,01 до 90 1/см, что соответствует приблизительно частотному диапазону от 500 Гц до 7,5 МГц.

Проведенные расчеты показывают принципиальную возможность применения разработанной методики для оценки параметров акустической эмиссии, возникающей в пластинах при локальной перестройке структуры их материала, путем выполнения расчетов, базирующихся на точном аналитическом решении волновых уравнений. В указанные расчеты должен быть также включен анализ спектральных характеристик АЭ датчиков.

Рассмотрим последний вопрос данной статьи – прогнозирование дальнейшего развития метрологии метода акустической эмиссии. Теоретическое исследование феномена АЭ, с точки зрения авторов, развивается вполне удовлетворительно. Тенденции многих лет показывают, что развитие самого метода тесно связано с развитием вычислительной и измерительной техники. Даже при современном уровне вычислительной техники для проведения расчетов такого порядка сложности, как в данной статье, в приемлемые временные сроки, требуется многократное увеличение ее мощности. Если основные параметры компьютера выразить через тактовую частоту и физическую память, то наилучшими для расчетов такой сложности были бы значения этих величин соответственно 30 ГГц и 30 Гб. Конечно, это достаточно серьезные показатели. Когда они будут достигнуты, произойдет существенное изменение в достоверности оценки состояния конструкций на основе АЭ данных. Если на первом этапе развития метода оценку осуществляли эксперты-люди на основе имеющихся знаний и опыта, а на данном этапе экспертную оценку осуществляет компьютер на основе статистических характеристик с использованием вектора состояния материала, то в недалеком будущем может состояться переход к оценке состояния материала на основе точных аналитических решений волновых задач.

Метод АЭ в свою очередь требует повышения качества и быстродействия измерительных приборов, поскольку необходимо более точно и с большей степенью надежности измерять результаты акустического отклика материала на внезапную перестройку его структуры.

Прогноз развития метода АЭ, выполненный в 1986 г. с привлечением компьютерных средств, показал (рис. 9), что к 2010 г. наука, компьютерная технология и измерительная техника позволят создать качественно новый уровень получения данных акустической эмиссии и их интеллектуального анализа. Можно предположить, что прогноз был достаточно верным, поскольку предсказанное на 1995 г. появление АЭ систем, успешно использующих статистические методы для оценки состояния материала, полностью оправдалось.

Таким образом, приблизительно в 2010 г. следует ожидать воплощения новых технологий, базирующихся на распознавании волновых процессов, в конкретных АЭ системах, что позволит решить на качественно новом, высоком уровне сложные вопросы метрологии данного метода.

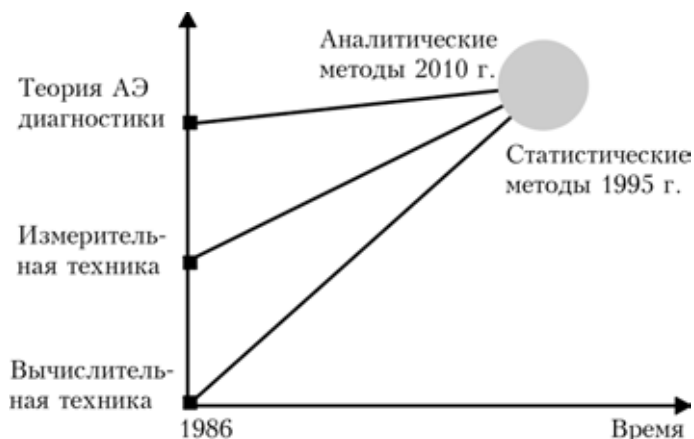


Рис. 9. Гипотетический график развития работ в Украине в направлении теории, методов и средств в области АЭ

Выводы. Получены аналитические выражения для расчета перемещений поверхности крупногабаритных пластин малых и средних толщин, позволяющие проводить расчетный анализ процессов образования волн в пластинах и их распространения на различные расстояния от источника. Расчетным путем получен спектральный состав волн, распространяющихся по пластине. Показана зависимость скорости распространения волны от ее частоты. Так, в пластине толщиной 10 мм в диапазоне волновых чисел от 0 до 90 1/см число элементарных волн, движущихся в пластине, равно 226. Такое количество волн, распространяющихся с различными скоростями, приводит к сложной форме суммарной волны и создает трудности при ее локации. В ближайшие годы следует ожидать существенных изменений в метрологии АЭ метода и способах принятия решения о состоянии объектов АЭ контроля, что связано с развитием аналитических методов оценки состояния материала на базе данных АЭ и прогрессом вычислительной техники.



1. Патон Б. Е. Современные направления исследований и разработок в области сварки и прочности конструкций // Автомат. сварка. — 2003. — Октябрь-ноябрь. — С. 7–13.
2. Патон Б. Е., Лобанов Л. М., Недосека А. Я. Техническая диагностика: вчера, сегодня и завтра // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2003. — № 4. — С. 6–10.
3. Paton B. E., Nedoseka A. J. Diagnostic of designs and safety of an environment // the Report on international conference "The human factor and environment" International Institute of Welding. — July 19-20. 1999. Lisbon, Portugal.
4. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / Под редакцией Б. Е. Патона. — Киев: Индпром, 2001. — 815 с.
5. Недосека А. Я. Влияние характера локальных изменений структуры материала на формирование упругих волн деформаций на поверхности толстой пластины // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1991. — № 3. — С. 66–73.
6. Pao Y. H., Gajevski R. R. Generalized ray theory and transient response of layered elastic solids // Physical acoustics. — 1997. — Т. 3. — № 6. — Р. 184–265.
7. Yih-Hsing Pao, Ralph Gajevski, Ahmet N. Ceranoglu. Acoustic emission and transient waves in an elastic plate // J. Acoust. Sos. Am. — Jan. 1979. — 65(1) — Р. 96–105.
8. Richard L. and Yih-Hsing Pao. Spectra of transient waves in elastic plates // J. Acoust. Sos. Am. — December. 1982. — 72(6) — Р. 1933–1941.
9. Недосека А. Я., Бойчук О. И. Аналитическое фундаментальное решение пространственной задачи термопластичности для слоя из неизотермического материала // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1996. — № 3. — С. 3–16.
10. Недосека С. А. Контроль линии синтеза аммиака системой АЭ диагностики ЕМА-3У // Там же. — 2003. — № 4. — С. 24–28.
11. Gillis P. P. Dislocation motions and acoustic emission / A symposium presented at the December Committee Week American Society for Testing and Materials // Bal Harbour. — 1971. — 7-8 December. — Р. 20–29.
12. Tetelman A. S., Chow R. Acoustic emission testing and micro cracking processes / Ibid. — Р. 30–40.
13. Nakamura Yosio, Veach C.L., McCauley B.O. Amplitude distribution of acoustic emission signals / Ibid. — Р. 164–186.
14. Fowler K. A. and Papadakis E. P. Observation and analysis of simulated ultrasonic acoustic emission waves in plates and complex structures / Ibid. — Р. 222–237.
15. Hartbower C. E., Reuter W. G., Morais C. F., Crimmins P. P. Use of acoustic emission for the detection of weld and stress corrosion cracking / Ibid. — Р. 187–221.
16. Balderston H. L. The broad range detection of incipient failure using the acoustic emission phenomena / Ibid. — Р. 297–317.
17. Недосека А. Я., Бойчук О. И., Овсиенко М. А. К вопросу об оценке погрешности определения координат источников акустико-эмиссионной информации на линейных объектах // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1999. — № 1. — С. 68–70.
18. Алешин Н. П. Новые информационные системы неразрушающего контроля и диагностики сварных конструкций // Автомат. сварка. — 2003. — Октябрь-ноябрь. — С. 64–69.
19. Фролов К. В., Махутов Н. А., Гаденин М. М. Определение прочности, ресурса и живучести конструкций // Там же. — 2003. — Октябрь-ноябрь. — С. 89–96.
20. Панасик В. В., Дмитрах І. М. Оцінка корозійно-втомної міцності зварних з'єднань як гетерогенних систем // Там же. — 2003. — Октябрь-ноябрь. — С. 105–111.
21. Махненко В. И. Совершенствование методов оценки остаточного ресурса сварных соединений конструкций длительного срока эксплуатации // Там же. — 2003. — Октябрь-ноябрь. — С. 112–121.
22. Скальський В. Р. Оцінка накопичення об'ємної пошкодженості твердих тіл за сигналами акустичної емісії // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2003. — № 4. — С. 29–36.
23. Гиренко В. С., Рабкина М. Д., Гиренко С. В. Физико-механические изменения в сталях при эксплуатации в водородосодержащих средах // Там же. — 2003. — № 4. — С. 18–23.
24. Бейтман Г., Эрдейи А. Таблицы интегральных преобразований // Т.1. Преобразования Фурье, Лапласа, Меллина. — М.: Наука, 1969. — 343 с.

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

Поступила в редакцию
01.06.2004



КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ПОВРЕЖДЕННОСТИ ПЛАСТИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ НАГРУЖЕНИЯ

Н. Г. ЧАУСОВ, С. А. НЕДОСЕКА, А. П. ПИЛИПЕНКО

Показаны преимущества метода полных диаграмм деформирования материалов для исследования влияния динамических перегрузок на кинетику накопления повреждений и трещиностойкость материалов при последующем статическом растяжении. Опыты проводили на образцах из реакторной стали в двух состояниях. На основе новых экспериментальных данных предложена и апробирована схема кинетики процесса накопления повреждений в материале для рассматриваемого случая нагружения. Результаты механических испытаний подтверждаются данными АЭ сканирования.

Advantages of the method of complete diagrams of material deformation are demonstrated for investigation of the influence of dynamic overloads on the kinetics of damage accumulation and crack resistance of materials at subsequent static tension. Experiments were conducted on samples of reactor steel in two conditions. New experimental data were the basis for suggesting and verifying the schematic of the kinetics of the process of damage accumulation in the material for the considered case of loading. Results of mechanical testing are confirmed by the data of AE scanning.

Введение. В работах [1, 2] сформулирована концепция поверхности предельной поврежденности материала, которая может быть положена в основу мониторинга остаточного ресурса конструкций. В соответствии с этой концепцией изменение режимов нагружения конструкций в сторону их ужесточения и эксплуатационная наработка приводят к снижению уровня предельной поврежденности пластичного материала. Для полностью охрупченного материала этот уровень становится минимальным, соответственно и способность материала сопротивляться росту трещин становится минимальной.

Очевидно, что любое изменение в истории нагружения конструкции приводит к изменению кинетики накопления повреждений в материале и их предельных значений [3].

Особую опасность для конструкций могут вызывать динамические перегрузки, так как по мнению многих исследователей они существенно повышают склонность материалов к охрупчиванию.

Однако даже в простейшей статически неопределимой конструкции, когда одновременно нагружаются три параллельных элемента в различных структурных состояниях, в случае внезапного хрупкого разрушения одного из элементов в материале соседнего элемента, который находится в упруго-пластическом состоянии, за счет динамического перераспределения нагрузки в системе могут протекать такие процессы деформирования, которые однозначно можно отнести к неисследованным [4].

Для изучения влияния указанных режимов нагружения на кинетику разрушения и трещиностойкость материала при последующем статическом растяжении очень эффективен метод полных диаграмм деформирования. При этом удается удачно совмещать все операции силового нагружения на одном и том же стандартном малогабаритном образце, а в качестве параметров, оценивающих предельную поврежденность и статическую трещиностойкость материала, целесообразно принимать удельную ра-

боту разрушения A_p [5] и параметр трещиностойкости K_λ [6].

Методика испытаний и исследуемые материалы. В настоящей работе приводятся данные по комплексной оценке поврежденности реакторной стали 12ХНЗМФА после двух специальных режимов термообработки при статическом растяжении и при сложных режимах нагружения (статическое растяжение–динамическая перегрузка–статическое растяжение) с использованием метода полных диаграмм деформирования.

Для проведения испытаний при сложных режимах нагружения на кафедре сопротивления материалов Национального аграрного университета Украины на базе испытательной машины ZD-100Pc разработана установка для испытания материалов с построением полных диаграмм деформирования, которая по всем параметрам выгодно отличается от известных [7]. Установка оборудована приспособлением, позволяющим реализовать сложные режимы нагружения (статическое нагружение–динамическая перегрузка–статическое нагружение) с записью полных диаграмм. В момент достижения заданной нагрузки на испытуемых образцах их подвергают динамическим перегрузкам за счет и хрупкого разрыва проб металла, устанавливаемых параллельно с образцом, на величину силового импульса $\Delta P_1, \Delta P_2, \dots, \Delta P_{\max}$, где предельная величина $\Delta P_{\max}$ соответствует разнице между максимальной и задаваемой нагрузкой.

Схема конструкции установки показана на рис. 1. Установка содержит неподвижную 1 и подвижную 2 траверсы, связанные с ними захваты 3 и 4, образец 5, устройство для обеспечения перемещений жесткости нагружающей системы 6, приспособление для реализации сложных режимов нагружения 7 и компьютеризированную измерительную систему (КИС) 8 для проведения и обработки результатов испытаний.

Все данные, которые регистрируются и визуализируются системой КИС в процессе экспери-

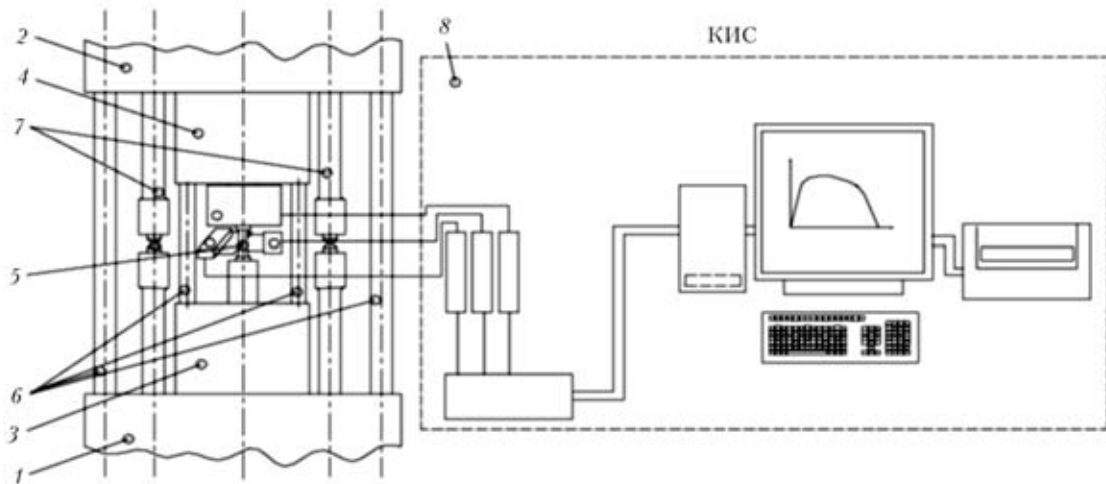


Рис. 1. Схема установки

мента, приводятся в физической размерности и с учетом тарировочных коэффициентов и нуля каналов. Разработанная система способна отображать в реальном масштабе времени график деформирования «нагрузка–удлинение», а после окончания эксперимента автоматически рисовать другие варианты графиков. Имеется возможность масштабирования любой части графика.

Для испытаний использовались гладкие цилиндрические образцы диаметром 8 мм и длиной рабочей части 25 мм.

На рис. 2 показаны участки диаграмм деформирования образцов из реакторной стали после первого режима термообработки, испытанных в условиях «статическое растяжение–динамическая перегрузка» с перегрузкой на зубе текучести (цифрами указаны номера испытанных образцов). Сразу после динамической перегрузки образцы разгружали для дальнейших металлофизических исследований. Здесь же для сравнения приведены стадии деформирования образцов из той же стали, испытанных при статическом растяжении и разгруженных при тех же степенях деформации, что и с учетом динамических перегрузок.

Как видно из рис. 2, динамические перегрузки существенно влияют на процесс деформирования стали. Для изучения особенностей структурного состояния стали после различных режимов на-

ружения использовалась феноменологическая модель накопления повреждений в металлических материалах при статическом растяжении, в соответствии с которой степень повреждения (разрушения) связана с деформацией соотношением [8]:

$$\epsilon_p = [1 - 2\mu(\epsilon)]\epsilon, \quad (1)$$

где $\mu(\epsilon)$ — текущее значение коэффициента поперечной деформации.

Деформация разрушения ϵ_p имеет устойчивую корреляцию с поврежденностью материала [9].

На рис. 3 приведены фрагменты графиков в момент динамической перегрузки образцов из реакторной стали с возрастающим силовым импульсом, свидетельствующие о том, что в момент динамической перегрузки изменяется плотность материала в волнах разрежения и сжатия. Причем, в зависимости от степени деформации, при которой проводилась динамическая перегрузка на зубе текучести, отмечаются некоторые различия в кинетике накопления повреждений. Однозначно можно утверждать, что динамическая перегрузка скачком увеличивает степень разрушения материала, в результате чего отмечается существенное разупрочнение материала по сравнению с деформационными процессами, проходящими в материале при статическом растяжении. В то же время, особенности деформирования материала на зубе текучести проявляются в том, что в случае динамической перегрузки материала образцов 4, 5 деформация разрушения ϵ_p последовательно возрастает в волнах разрежения и сжатия. В случае же динамической перегрузки материала образца 7 деформация разрушения резко возрастает в волне разрежения и падает в волне сжатия.

Следует отметить, что величина скачка ϵ_p зависит не только от величины силового динамического импульса, но также и от стадии деформирования, на которой этот импульс осуществляется. Анализ результатов испытаний свидетельствует также о том, что кинетика процесса разрушения в волнах разрежения и сжатия неоднозначна. Для понимания этих тонких процессов требуются дополнительные исследования.

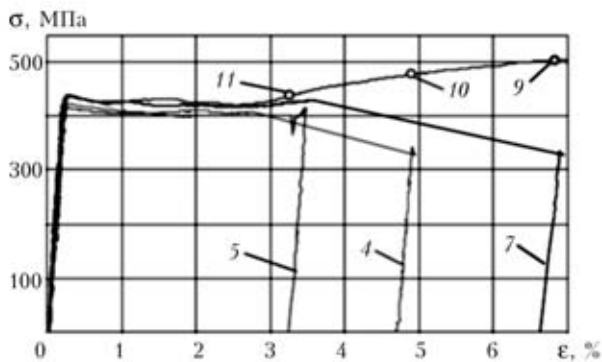


Рис. 2. Участки диаграмм деформирования образцов из реакторной стали после первого режима термообработки при различных режимах нагружения

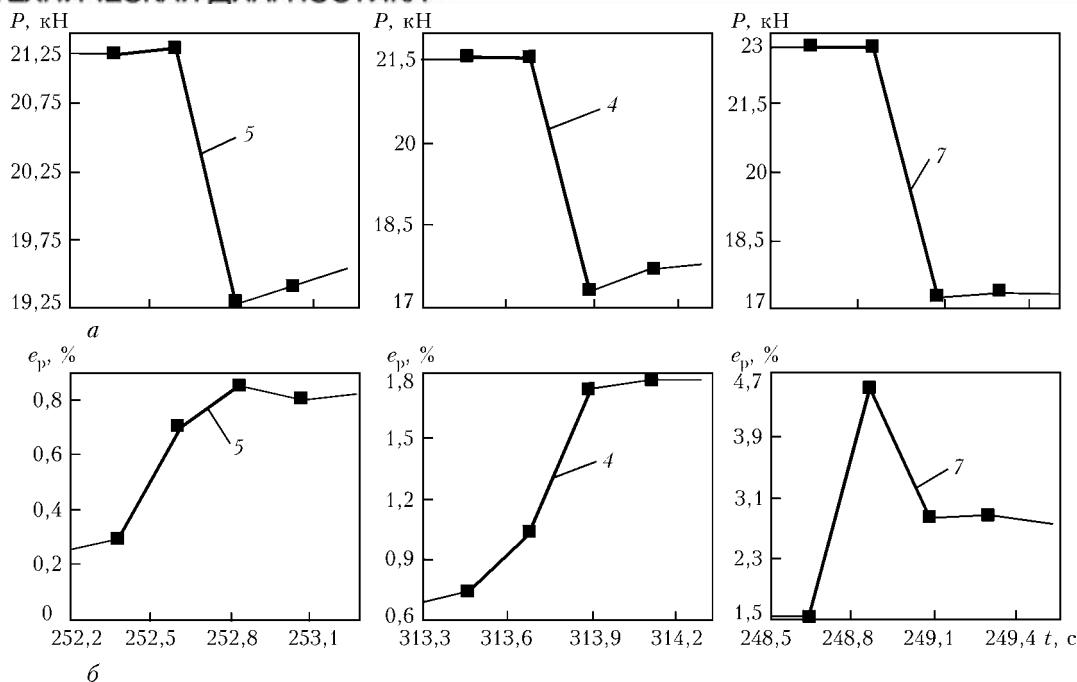


Рис. 3. Фрагменты графиков в момент динамической перегрузки образцов из реакторной стали после первого режима термообработки: а — изменение нагрузки; б — изменение деформации разрыхления (нумерация образцов соответствует рис. 2)

Не менее интересными оказались данные по оценке степени разрыхления материала в результате динамической перегрузки с использованием метода АЭ сканирования [10]. Этот метод аналогичен методу ультразвуковой дефектоскопии, отличаясь тем, что для излучения и приема сигналов используется АЭ аппаратура, а анализ принятых сигналов аналогичен анализу сигналов при обычных АЭ испытаниях.

Полученные данные весьма интересны еще по одной причине. В данной работе впервые для прозвучивания материала применяли аппаратуру нового поколения ЕМА-3. Несмотря на сходство технологий, заложенных в основу системы ЕМА-3 и используемой ранее ЕМА-2, между ними имеются различия, и важно было подтвердить, что с помощью новой аппаратуры также можно получать устойчивые зависимости между поврежденностью материала и параметрами акустических сигналов.

В целом технология сканирования аналогична используемой в работах [8, 10]. На торцах разгруженных образцов прикрепляли два датчика АЭ, один из которых служил имитатором сигналов АЭ, другой — приемником сигналов. Встроенный в систему ЕМА-3 генератор сигналов АЭ позволяет при необходимости использовать датчик в качестве излучателя. Серии одинаковых сигналов прямоугольной формы, амплитудой 4 В и длительностью 2 мкс подавали на датчик с интервалом 1 с. Параметры акустических сигналов, воспринимаемых датчиком, регистрировала АЭ аппаратура. В результате обработки опытных данных установлено, что по мере возрастания динамического силового импульса на образце амплитуда воспринимаемых акустических сигналов затухает, а время возрастания сигнала до максимального значения амплитуды, т. е. длительность события АЭ, наоборот, увеличивается.

В качестве параметра, позволяющего оценить степень поврежденности материала в результате динамической перегрузки, принимают характеристику, имеющую смысл скорости нарастания акустического сигнала до максимума $V_i = A_{\max i} / R_{\max i}$. Критерий оценки опасности накопленных в металле образца повреждений принимают в виде

$$\Delta W_i = 1 - \frac{V_{\text{повр.}i}}{V_{\text{исх.}i}}, \quad (2)$$

где $V_{\text{исх.}i}$ — скорость нарастания сигнала до максимума в неповрежденном образце.

На рис. 4 приведены данные сопоставления степени поврежденности материала образцов после динамических перегрузок с использованием двух приведенных выше методов.

Оценку поврежденности материала методом АЭ сканирования проводили при двух из наиболее высоких уровней чувствительности аппаратуры (коэффициенты усиления 80 и 100 дБ). Как видно, имеется устойчивая корреляционная зависимость между двумя методами исследований. При более высокой чувствительности аппаратуры полученные

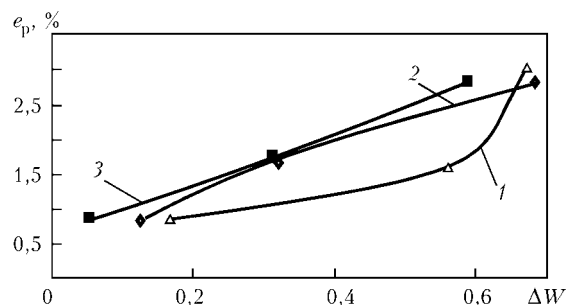


Рис. 4. Поврежденность образцов из реакторной стали после первого режима термообработки при различных режимах нагружения: 1 — при статическом растяжении (чувствительность аппаратуры 100 дБ); 2, 3 — с учетом динамических перегрузок (чувствительность аппаратуры соответственно 100 и 80 дБ)

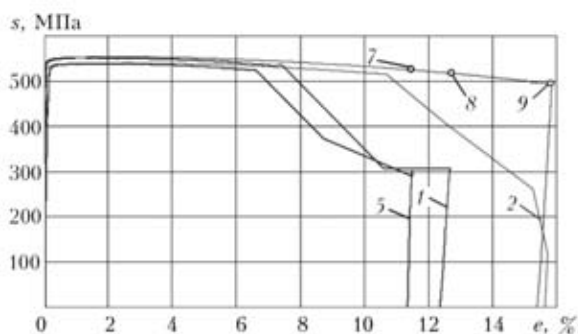


Рис. 5. Участки диаграмм деформирования образцов из реакторной стали после второго режима термообработки при различных режимах нагружения

физические зависимости наиболее адекватны. Здесь же на рис. 4 приведена зависимость исследованных параметров для случаев чисто статического растяжения образцов из реакторной стали при тех же конечных уровнях деформаций. Отмечаются существенные различия в их форме. Однако пока не представляется возможным однозначно говорить о том, что по совокупности описанных методов исследования структурного состояния металла можно предсказать историю нагружения материала.

На рис. 5 показаны участки диаграмм деформирования образцов из реакторной стали после второго режима термообработки, испытанных в условиях «статическое растяжение—динамическая перегрузка» с перегрузками на ниспадающей ветви диаграмм деформирования (цифрами указаны номера испытанных образцов). Сразу после динамической перегрузки образцы разгружали для дальнейших металлофизических исследований. Здесь же, для сравнения, приведены стадии деформирования образцов из той же стали, испы-

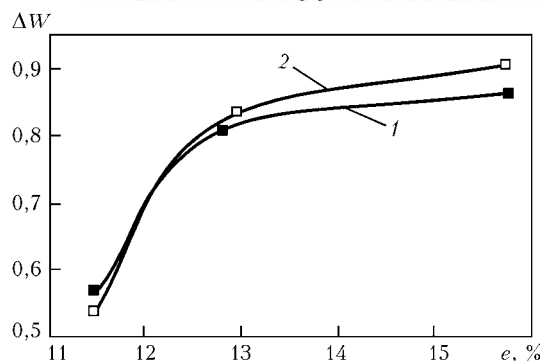


Рис. 7. Поврежденность образцов из реакторной стали после второго режима термообработки при различных режимах нагружения: 1 — при статическом растяжении; 2 — с учетом динамических перегрузок

танных при статическом растяжении и разгруженных при тех же степенях деформации, что и с учетом динамических перегрузок.

Как видно из рис. 5, динамические перегрузки на ниспадающей ветви диаграмм так же существенно влияют на процесс деформирования стали. Учитывая, что сталь 12ХНЗМФА после второго режима термообработки проявляет анизотропию пластических свойств, модель, приведенная в работе [8], не пригодна для описания кинетики накопления повреждений. В данном случае, для оценки степени разрыхления материала после разных режимов нагружения использовали только метод АЭ сканирования.

Для того, чтобы подтвердить достоверность экспериментально фиксируемого факта падения нагрузки на образце в процессе динамической перегрузки и отсутствие осцилляции сигнала нагрузки был проведен специальный опыт.

В базовых опытах диаграмма деформирования материала записывается при 18 измерениях в секунду и усреднении результатов эксперимента по 50 измерениям. В специальном опыте диаграмма деформирования точно так же записывалась при 18 измерениях в секунду, но фактически без усреднения (коэффициент усреднения равнялся 1).

На рис. 6, а приведены результаты эксперимента: на рис. 6, б показаны развертки во времени нагрузки, продольного удлинения и поперечного сужения образца 4 в процессе динамической перегрузки. Таким образом, дополнительно экспериментально подтверждено, что нагрузка в процессе динамической перегрузки падает и при данной скорости измерений не осциллирует. То, что нагрузка на образце падает в процессе динамической перегрузки легко проверяется экспериментально и другим способом, необходимо только сразу после динамической перегрузки нагрузить (или разгрузить) образец. Повторная нагрузка (или разгрузка) начинается именно с той точки диаграммы деформирования, до которой упала нагрузка после динамической перегрузки.

На рис. 7 приведены данные по оценке степени разрыхления образцов 5, 1, 2 (см. рис. 5) из реакторной стали после динамической

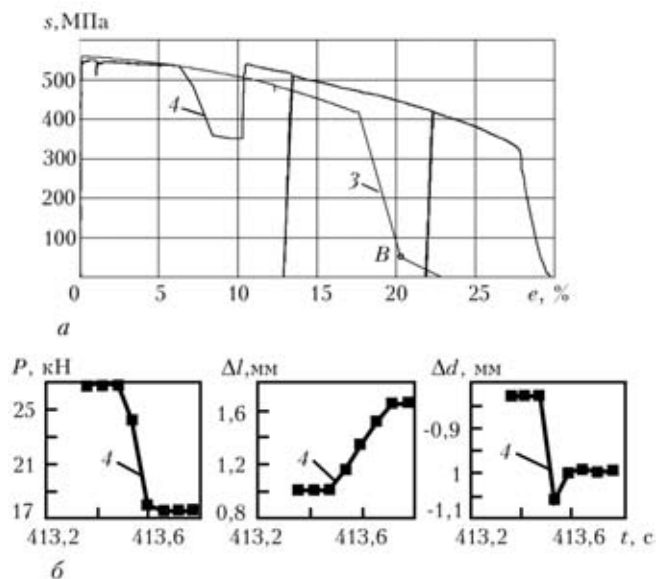


Рис. 6. Полные диаграммы деформаций образцов из реакторной стали после второго режима термообработки с учетом динамических перегрузок: а — образец 3 — регистрация при 18 измерениях в секунду и при усреднении 50; 4 — регистрация при 18 измерениях в секунду и при усреднении 1; б — развертка во времени изменения нагрузки и деформаций образца 4 в процессе динамической перегрузки

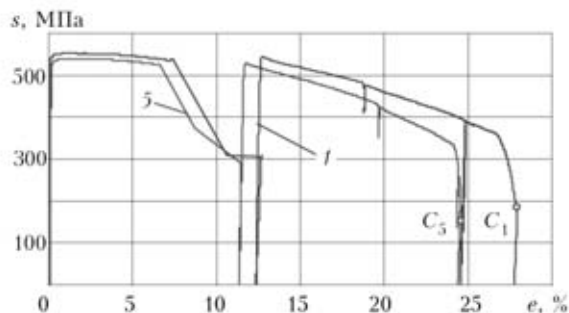


Рис. 8. Полные диаграммы деформаций образцов из реакторной стали после второго режима термообработки с учетом динамических перегрузок (нумерация кривых согласно рис. 5)

ческих перегрузок с использованием метода АЭ сканирования при чувствительности аппаратуры 100 дБ. Здесь же приведена зависимость исследованного параметра $\Delta W(\epsilon)$ для случаев чисто статического нагружения образцов 7, 8, 9 (см. рис. 5) при тех же конечных уровнях деформаций. Отмечается, с одной стороны, качественное подобие кривых, а, с другой, и некоторые различия в их форме, обусловленные сменой режима нагружения. Принимая в расчет устойчивую корреляционную зависимость между параметрами ΔW и ϵ_p (см. рис. 4), можно по изменению параметра $\Delta W(\epsilon)$ судить о степени поврежденности материала на ниспадающей ветви диаграмм деформирования.

Следует обратить внимание на тот факт, что для исследованной стали удалось установить ту степень деформирования металла, при которой динамическая перегрузка заданной величины привела практически к полному равновесному разделению образца на части (срыв нагрузки произошел только в точке В, см. рис. 6, кривая 3).

Повторное статическое растяжение образцов 5, 1, 2 после динамических перегрузок и образца 9 после предварительного статического растяжения с записью полных диаграмм деформаций (см. рис. 8, 9) показывает, насколько существенны эффекты, связанные с динамическими перегрузками. Для оценки дефекта модуля упругости материала в процессе деформирования выполнялись частичные разгрузки образцов (точками C_i на рис. 8, 9 обозначены значения деформаций, при которых выполнялись окончательные разгрузки образцов с макротрещинами для дальнейших металлофизических исследований).

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о неоднозначном влиянии динамических перегрузок на предельную поврежденность и трещиностойкость сталей в разных структурных состояниях. Так, для реакторной стали после первого режима термообработки отмечается незначительное уменьшение параметров A_p и K_λ после динамических перегрузок на зубе текучести, что является предсказуемым эффектом.

Сравнение же предельной поврежденности и трещиностойкости реакторной стали после второго режима термообработки при статическом растяжении и с учетом динамических перегрузок на ниспадающей ветви диаграмм показало увеличение

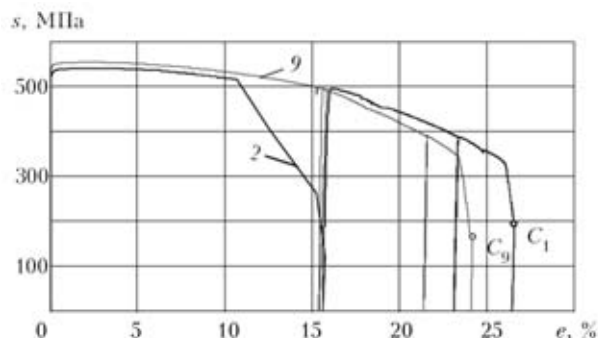


Рис. 9. Полные диаграммы деформаций образцов из реакторной стали после второго режима термообработки при чисто статическом растяжении и с учетом динамической перегрузки (нумерация кривых согласно рис. 5)

параметров A_p и K_λ после перегрузок. Если при статическом растяжении образца 9 — $A_p = 0,022 \text{ кН/мм}^3$ и $K_\lambda = 15,21 \text{ кН/мм}^{3/2}$, то для образцов 5, 1, 2 — A_p и K_λ соответственно, равны 0,028, 0,036, 0,025 и 17,34 $\text{кН/мм}^{3/2}$, 19,71 и 16,38 $\text{кН/мм}^{3/2}$.

Ранее установлено, что кривая, которая описывает закон накопления повреждений при статическом растяжении в соответствии с моделью [5], имеет S-образный характер с тремя ярко выраженными участками, которые отображают истинные физические процессы, протекающие в деформируемом материале (образование пор, их рост и слияние). Динамические перегрузки на стадиях образования и роста пор вносят существенные изменения в кинетику накопления повреждений, что, в первую очередь, влияет на стадию слияния пор и на предельную поврежденность материала (рис. 10). Здесь кривая 1 представляет зависимость $\epsilon_p(\epsilon)$ при статическом растяжении.

Следует учитывать, что именно от величины динамического импульса, который характеризуется производной $d\epsilon_p/d\epsilon$ и стадии деформирования, на которой производятся динамические перегрузки, зависит кинетика накопления повреждений и трещиностойкость материала при последующем статическом растяжении.

В пределе, при $d\epsilon_p/d\epsilon = 1$ реализуется хрупкое разрушение материала.

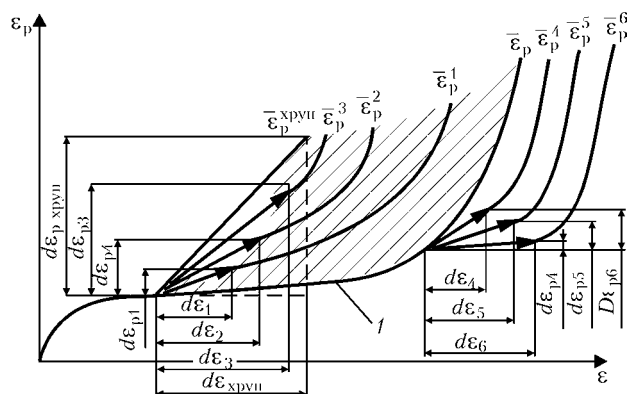


Рис. 10. Зависимость предельной поврежденности материала ϵ_p от величины приложенного динамического силового импульса и от стадии деформирования при динамических перегрузках



Как уже отмечалось, модель, приведенная в работе [8], неприменима для анизотропных материалов и она также не учитывает возможности фазовых, полиморфных и других превращений. Поэтому для оценки предельной поврежденности материала целесообразно использовать удельную работу разрушения A_p и в данном случае предельные значения ϵ_p^i (см. рис. 10) будут соответствовать значениям A_p .

Выводы

Разработана эффективная методика исследования влияния динамических перегрузок на кинетику накопления повреждений и трещиностойкость сталей при последующем статическом растяжении с использованием метода полных диаграмм.

На примере испытаний реакторной стали в двух состояниях показано неоднозначное влияние динамических перегрузок на предельную поврежденность и статическую трещиностойкость сталей.

Показана перспективность использования метода АЭ сканирования для оценки текущего состояния сталей при сложных режимах нагружения, в том числе при наличии структурных превращений.

Для рассматриваемой стали в двух состояниях предложена и апробирована схема кинетики процесса накопления повреждений в материале при сложных режимах нагружения (статическое растяжение–динамическая перегрузка–статическое растяжение).

1. Лебедев А. А., Чаусов Н. Г., Богданович А. З. Оценка предельных повреждений в материалах при статическом

нагружении с учетом вида напряженного состояния // Пробл. прочности. — 2002. — № 2. — С. 35–40.

2. Lebedev A. A., Chausov N. G., Bogdanovich A. Z. Model for Damage Accumulation in a Material under Multiaxial Loading. // In Proc. of The Sixth Int. Conf. on Biaxial / Multiaxial Fatigue and Fracture. — Ed. Manuel Morlina de Freitas- Lisbon. — Portugal. — 2001. — № 2. — P. 1023–1029.
3. Проблемы обеспечения надежности, ресурса и безопасности ядерных энергетических установок / Ф. М. Митенков, Г. Ф. Городов, Ю. Г. Коротких, В. А. Панов, С. Н. Пичков // Пробл. машиностроения и надежности машин. — 2002. — № 2. — С. 106–112.
4. Чаусов Н. Г., Пилипенко А. П. Кинетика разрушения металлов при сложных режимах нагружения // Механика микронеоднородных материалов и разрушение // III Всерос. семинар им. С. Д. Волкова. Сб. тез. докл. — Россия, Екатеринбург, 25–26 марта 2004. — С. 70.
5. Чаусов Н. Г., Лебедев А. А., Богданович А. З. О предельной поврежденности материала в зоне концентратора // Пробл. прочности. — 2002. — № 6. — С. 17–21.
6. Лебедев А. А., Чаусов Н. Г. Феноменологические основы оценки трещиностойкости материалов по параметрам спадающих участков диаграмм деформаций // Там же. — 1983. — № 2. — С. 6–10.
7. Патент України № 61760 / Чаусов М. Г., Ярошенко В. Ф., Пилипенко А. П. Установка з регульованою жорсткістю навантажувальної системи. — 17.11.2003. Бюл. № 11.
8. Модель накопления повреждений в металлических материалах при статическом растяжении / А. А. Лебедев, Н. Г. Чаусов, И. О. Богинич, С. А. Недосека // Пробл. прочности. — 1995. — № 7. — С. 31–40.
9. Лебедев А. А., Чаусов Н. Г. Новые методы оценки деградации механических свойств металла конструкций в процессе наработки. — Киев, Изд-ние Ин-та проблем прочности, 2004. — 133 с.
10. Оценка поврежденности металла действующих газопроводов методом АЭ-сканирования / А. А. Лебедев, А. Я. Недосека, Н. Г. Чаусов, С. А. Недосека // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2001. — № 1. — С. 8–12.
11. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций. — Киев, Индпром, 2001. — 815 с.

Нац. аграрн. ун-т НАН Украины,
МГП ИНДПРОМ, г. Киев

Поступила в редакцию
15.06.2004



Украина, 83055,
г. Донецк,
ул. Горького, 158,
а/я 7934
(062) 345-00-82,
-83, -84
E-mail:
intron@skif.net

НПП «Интрон-СЭТ»

Проводит ремонт приборов неразрушающего контроля, в том числе дефектоскопов МИРА и АРИНА.

Поставляет весь спектр приборов и оборудования для НК и ТД.

Новинки: приборы контроля качества стройматериалов и конструкций (ОНИКС, ПОИСК, ПУЛЬСАР); ультразвуковые дефектоскопы СКАРУЧ, ПЕЛЕНГ-УДЗ-103, автоматизированный комплекс ультразвукового контроля колёсных пар вагонов ПЕЛЕНГ-АВТОМАТ.

У Вас задачи? У нас решения!



ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПЛАСТИН С ДЕФЕКТАМИ В ВИДЕ ТРЕЩИН РАЗЛИЧНОЙ ГЛУБИНЫ

О. И. БОЙЧУК, А. И. ЗИРКА, В. М. СИЧКО

Рассмотрено влияние глубины несквозного трещиноподобного дефекта на поверхности пластины толщиной 10 мм на концентрацию напряжений в устье дефекта и в его средней части. Показано постепенное увеличение коэффициента концентрации напряжений по мере превращения несквозного дефекта в сквозной.

The paper deals with the influence of the depth of an incomplete cracklike defect on the surface of a plate 10 mm thick on stress concentration in the defect mouth and its middle part. A gradual increase of the stress concentration factor is demonstrated as the defect develops from an incomplete into a complete defect.

Для оценки влияния глухих концентраторов на прочность внешней и внутренней поверхностей резервуара приведены результаты исследования напряженного состояния пластин с дефектами в виде трещин различной глубины. Исследования выполнены поляризационно-оптическим методом. Описание метода и его приложений посвящена литература [1–3]. В данной статье кратко описана методика экспериментального исследования оптически чувствительных пластин, а также проведение эксперимента и даны результаты исследований пластин с прорезями.

Из прозрачного материала, в котором при появлении механических напряжений и деформаций возникает эффект искусственного двойного лучепреломления, изготавливается модель натурной конструкции, которая подвергается нагружению подобно реально действующим силам.

Известно, что при освещении модели поляризованным светом можно наблюдать через поляроиды картину интерференционных полос, появление которых связано с величиной и направлением действия главных напряжений σ_1 , σ_2 , σ_3 в каждой точке. Используя это, получаем возможность наиболее просто исследовать плоские мо-

дели, так как в этом случае определению подлежат лишь три величины σ_1 , σ_2 и φ — параметр изоклины, показывающей направление действия большего напряжения. Обычно применяемые в фотоупругости приборы позволяют наблюдать два семейства интерференционных полос — изоклины (изолинии разных углов наклона главных напряжений) и изохромы (изолинии разности главных напряжений). Измеряемые при этом параметр φ и разность хода δ , как известно, связаны с разностью главных напряжений и компонентами тензора напряжений следующими соотношениями:

$$\begin{aligned}\sigma_1 - \sigma_2 &= \frac{\delta}{Ct} = n\sigma_0, \quad \sigma_0 = \frac{1}{Ct}, \\ \sigma_x - \sigma_y &= \frac{\delta}{Ct} \cos 2\varphi = n\sigma_0 \cos 2\varphi, \\ \tau_{xy} &= \frac{\delta}{2Ct} \sin 2\varphi = \frac{n\sigma_0}{2} \sin 2\varphi,\end{aligned}$$

где C — относительный оптический коэффициент напряжений (характеристика материала); σ_0 — цена полосы модели (разность главных напряжений, вызывающих появление в модели одной первой полосы); n — порядок интерференционной полосы (изохромы); t — толщина модели; λ — длина волны применяемого поляризованного света; σ_0 , C , а также модуль упругости материала E и коэффициент Пуассона ν определяются на тарировочных диаметрально сжатых дисках по обычной методике [1]:

$$C = \frac{\delta \pi D}{8P}, \quad E = P \frac{4 - \pi(1 - \nu)}{\pi t \Delta D}, \quad \nu = \frac{(4 - \pi) D \Delta t}{4 t \Delta D - \pi D \Delta t},$$

где D — диаметр диска; ΔD — приращение горизонтального диаметра; t — толщина диска; Δt — приращение толщины диска в центре; P — нагрузка; δ — оптическая разность хода в центре диска.

Таким образом, при применении обычной в фотоупругости аппаратуры и методики измерений можно определить разность напряжений σ_x и σ_y .

В наших исследованиях в качестве материала пластин использовано оптически чувствительное оргстекло Э-2, оптико-механические характерис-

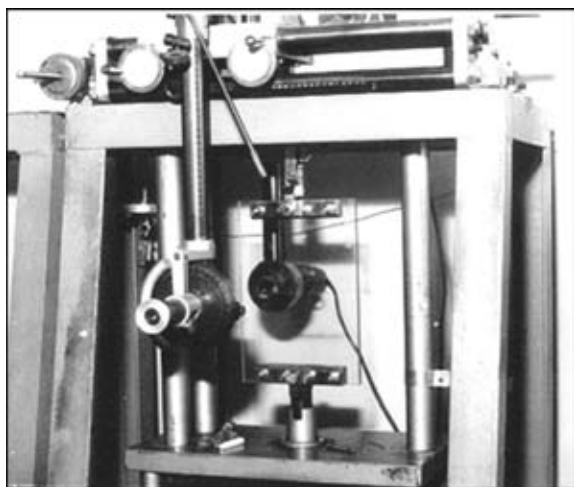


Рис. 1. Нагружение пластины на универсальном прессе УП-8, установленном на КСП-6 с компенсатором Краснова СКК

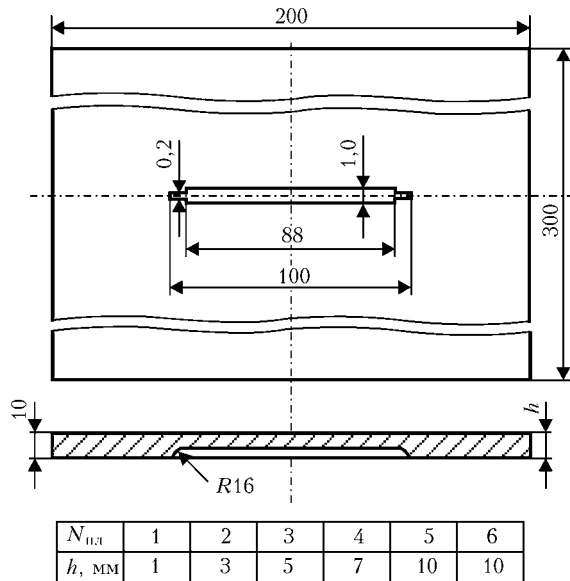


Рис. 2. Эскиз пластины с прорезью

тики которого при комнатной температуре следующие: модуль упругости $E = 3 \cdot 10^4$ кГ/см, относительный оптический коэффициент $C = 39 \cdot 10^{-7}$ см²/кГ, коэффициент Пуассона $\nu = 0,32$.

Фотографирование картин полос проведено при нормальном просвечивании плоскости пластин на фотоэластичметре типа Меопта FP с натриевым источником света ($\lambda = 589$ мкм). Замеры оптической разности хода и параметров изоклины в пластинах проводили на координатно-синхронном поляриметре КСП-6 с компенсатором Краснова СКК (рис. 1). Пластины изготавливались на фрезерном станке при малых оборотах, не допускающих нагрева материала.

Исследовано напряженное состояние шести вариантов пластин. Размеры пластин: длина 300 мм, ширина 200 мм, толщина 10 мм. Трещины в пластинах моделировали в виде поперечных прорезей (длиной $\lambda = 100$ мм), состоящих из двух фрагментов: середина прорези (длиной $\lambda = 88$ мм) выполнялась фрезой диаметром 70 мм, толщиной 1 мм, концы прорези выполняли фрезой диаметром 32 мм, толщиной 0,2 мм.

Эскиз пластины показан на рис. 2.

В первой пластине прорезь выполняли на глубину 1 мм, во второй — на глубину 3 мм, в третьей — на глубину 5 мм, в четвертой — на глубину 7 мм. В пятой пластине выполняли сквозную прорезь с радиусным закруглением $R = 16$ мм в концах прорези (см. рис. 2). В шестой — сквозная прорезь, концевые части которой пропиливали заостренной пилочкой толщиной 0,1 мм, изготовленной из лезвия бритвы. Созданная прорезь достаточно близко моделирует натуральную трещину.

Пластины нагружались растягивающими усилиями: 1–3 пластины $P = 100; 200; 350$ кГ соответственно, 4 и 5 — усилиями $P = 100; 200; 300$ кГ, 6 — усилиями $P = 50; 100; 200$ кГ. В нагруженных пластинах на координатно-синхронном поляриметре КСП-6 компенсатором Краснова в характерных точках измерялись оптическая раз-

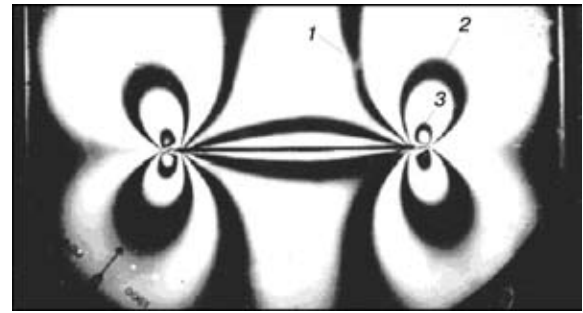


Рис. 3. Картина полос в пластине № 5 ($h = 10$ мм) со сквозной прорезью и радиусным закруглением в усиках дефекта при нагрузке $P = 300$ кГ (1–3 — порядок интерференционных полос)

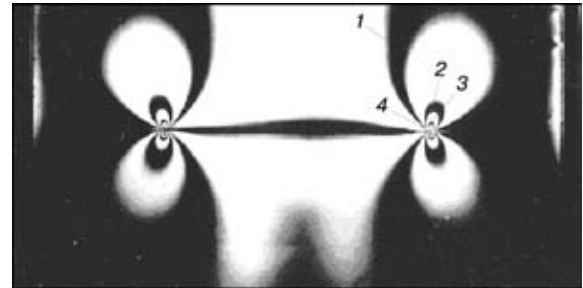


Рис. 4. Картина полос в пластине № 6 ($h = 10$ мм) со сквозной прорезью без радиусных закруглений в усиках дефекта при нагрузке $P = 200$ кГ

ность хода δ и параметры изоклин ϕ . По этим данным определялись напряжения в зоне прорези.

В некоторых пластинах проведено фотографирование картин полос в зоне прорези глубины h (рис. 3, 4). По данным таблицы построены графики на рис. 5, 6.

В таблице для всех шести пластин приведены значения концентрации напряжений K_k в усиках дефектов и значения приведенных напряжений $\sigma_{пр.ср}$

$$K_k = \frac{\sigma_k}{\sigma_{ном}}, \quad \sigma_{пр.ср} = \frac{\sigma_{ср}}{\sigma_{ном}}, \quad (1)$$

определенных как отношение напряжений, действующих на концах и в середине прорезей, к номинальным, определенных по формуле:

$$\sigma_{ном} = \frac{P}{F}, \quad (2)$$

где P — нагрузка на пластину; F — площадь неослабленного сечения.

Напряжения σ_k в концах прорези усреднены по толщине пластины $t = 10$ мм. Напряжения в середине прорези $\sigma_{ср}$ усреднены по толщине t с учетом глубины прорези. В случае сквозной прорези усреднение проводили по всей толщине пластины.

$N_{пл}$	1	2	3	4	5	6
h , мм	1	3	5	7	10	10
K_k	1,05	1,10	1,20	1,35	3,10	11,0
$\sigma_{пр.ср}$	1,08	1,30	1,70	2,90	-1,60	-1,90

По данным таблицы построены графики (рис. 5, 6).

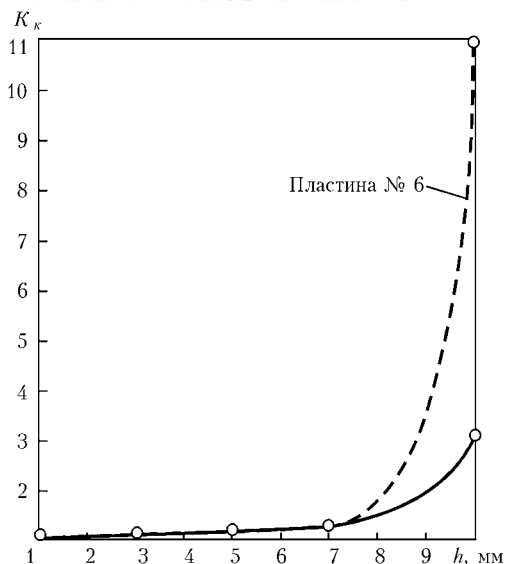


Рис. 5. Концентрация напряжений в усиках дефекта с радиусным закруглением дефекта (сплошная линия) и без закругления (штриховая) в зависимости от глубины прорезей

Выводы

Из таблицы и графиков на рис. 5, 6 следует следующее.

1. В пластинах при глубине прорези от 1 мм до 7 мм концентрация напряжений в «усиках» дефектов (прорези) с увеличением глубины дефекта возрастает незначительно, а именно от 1,05 до 1,35; приведенные напряжения в середине прорези увеличиваются от 1,08 до 2,9 при увеличении глубины прорези; с увеличением глубины несквозных прорезей отношение приведенных напряжений в средней части пластины на внутренней поверхности прорези к приведенным напряжениям на концах прорези («усиках» дефекта) увеличивается более чем в два раза. Отсюда следует, что в случае критических нагрузок, разрушение пластины с несквозными трещиноподобными дефектами на ее поверхности будет происходить в срединной части пластины.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев
Ин-т механики им. С. П. Тимошенко НАН Украины, Киев
Николаевский гос. ун-т

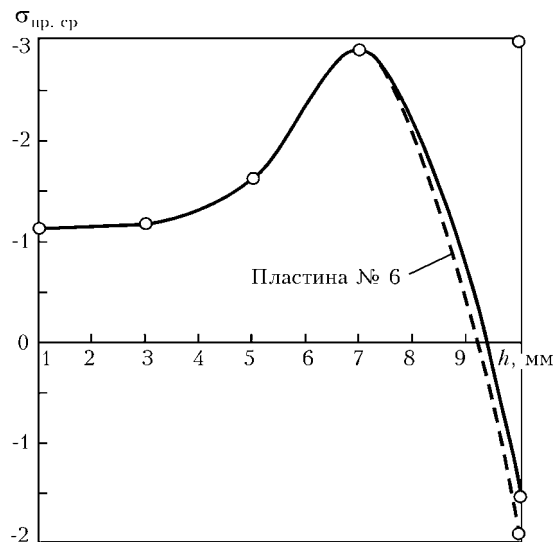


Рис. 6. Приведенные напряжения в середине прорези в пластинах с радиусным закруглением дефекта (сплошная линия) в зависимости от глубины прорезей и без закругления (штриховая)

2. В пластине № 5 со сквозной прорезью и радиусным закруглением $R = 16$ в концах прорези концентрация напряжений равна 3,1, а в середине пластины возле прорези приведенные напряжения меняют знак и равны -1,6.

3. В пластине № 6 со сквозной прорезью без закруглений в «усиках» дефекта концентрация напряжений равна 11,0; в середине пластины возле прорези приведенные напряжения равны -1,9.

В пластинах со сквозными дефектами разрушение будет проходить возле «усиков» дефекта.

1. Александров А. Я., Ахметзянов М. Х. Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела. — М.: Наука, 1973. — 567 с.
2. Дюрелли А., Райли У. Введение в фотомеханику (поляризационно-оптический метод). — М.: Мир, 1970. — 484 с.
3. Экспериментальная механика. Кн. 1. — М.: Мир, 1990 — 615 с.

Поступила в редакцию
20.09.2003

МЕТОДИКА, ТЕХНОЛОГИЯ И АППАРАТУРА ШИРОГРАФИЧЕСКОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ МАТЕРИАЛОВ И ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

Л. М. ЛОБАНОВ, В. А. ПИВТОРАК, Е. М. ОЛЕЙНИК, И. В. КИЯНЕЦ

Рассмотрен метод неразрушающего контроля (НК) качества конструкций на основе использования электронной широкографии, заключающийся в сравнении двух спекл-картин исследуемой поверхности, полученных в исходном и нагруженном состоянии объекта. Представлены результаты методических экспериментов, на основе которых была создана технология по выявлению дефектных участков (трещин, расслоений и непроваров) в сотовых панелях и сварных конструкциях.

A method is considered of NDT of the quality of structures based on electron shearography, which consists in comparison of two speckle-patterns of the studied surface, derived in the initial and loaded condition of the object. Results of procedural experiments are presented, which were the basis for development of the technology of revealing the defective areas (cracks, delaminations and lacks-of-penetration) in honeycomb panels and welded structures.

Обеспечение высокого качества изготовления конструкций является одной из наиболее важных научно-технических задач, решение которых становится все более актуальным по мере усложнения конструкции. Эта проблема многогранна и требует решения по нескольким направлениям. Среди них ответственная роль принадлежит разработке и широкому применению современных методов и средств НК, эффективность которых определяется прежде всего достоверностью и производительностью.

В мировой практике производства конструкций, таких как авиационное, энергетическое оборудование и др. стоимость проведения операций по НК достигает 20...25 % от общей стоимости изделия. Поэтому совершенствование традиционных и разработка новых методов и средств контроля качества с использованием современных достижений науки и техники весьма актуально.

Для НК качества изделий, изготовленных из металлических и композиционных материалов, используются методы лазерной интерферометрии, которые дают возможность получать полную и наглядную картину состояния исследуемого объекта [1-3]. Наиболее перспективным из них является метод электронной широкографии, суть которого состоит в следующем. Поверхность контролируемого объекта частично или полностью освещается лазерным светом. Отраженное от поверхности лазерное излучение попадает на широкоэлемент, который размещен перед объективом CCD-камеры и разделяет его апертуру на две половины (рис. 1). При этом в плоскости регистрации образуются два смещенных изображения объекта 1'-2' и 1''-2''. Угол γ при вершине широкоэлемента определяет величину смещения между изображениями. В качестве такого элемента можно использовать, например, стеклянный клин с малым углом ($3/4$ градуса) при вершине. Световые волны интерферируют, образуя хаотическую микроинтерферен-

ционную спекл-картину, которая CCD-камерой вводится в компьютер. Полученные микроинтерференционные спекл-картины, записанные в двух состояниях объекта (до и после его нагружения), сравниваются и обрабатываются до получения макроинтерференционных полос (широграммы). Принцип работы широкографического устройства, его принципиальная и оптическая схема хорошо известны [1, 6]. Из анализа оптической схемы широкографического интерферометра получены основные зависимости, связывающие относительную разность фаз $\Delta\phi$ с параметрами оптической схемы (коэффициенты C_1-C_3) и производными от перемещений u , v и w . При широмещении в Ox и Oy направлениях разность фаз $\Delta\phi$ соответственно будет [6]:

$$\Delta\phi_x = \frac{2\pi}{\lambda} \left(C_1 \frac{\partial u}{\partial x} + C_2 \frac{\partial v}{\partial x} + C_3 \frac{\partial w}{\partial x} \right) \delta x, \quad (1)$$

$$\Delta\phi_y = \frac{2\pi}{\lambda} \left(C_1 \frac{\partial u}{\partial y} + C_2 \frac{\partial v}{\partial y} + C_3 \frac{\partial w}{\partial y} \right) \delta y, \quad (2)$$

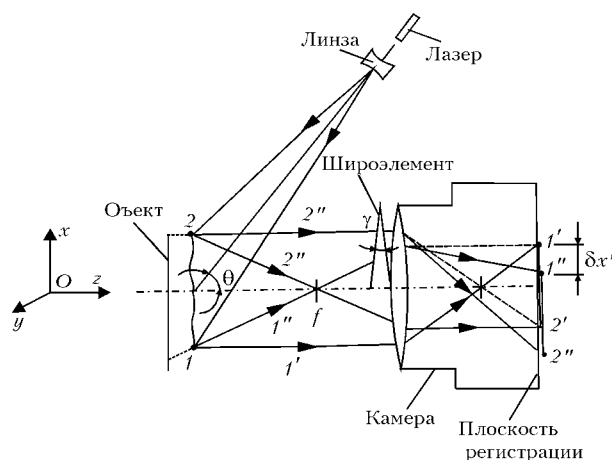


Рис. 1. Принципиальная схема широкографического устройства со смещением в x -направлении (1, 2 — точки на объекте)

где λ — длина волны лазерного источника; C_1 – C_3 — константы, которые определяются конфигурацией оптической схемы; δx и δy — величины широдвига в выбранных направлениях Ox и Oy . Физический смысл равенств (1) и (2) приближенно отражает градиент деформации в заданном широнаправлении.

При проведении НК качества направление освещения выбирают по возможности ближе к нормали поверхности объекта. В этом случае после несложных преобразований равенств (1) и (2) для темных и светлых интерференционных полос на широграмме получают следующие зависимости:

для темных интерференционных полос

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\Delta \phi \lambda}{4\pi \delta x} = \frac{(2N+1)\lambda}{4\delta x}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial y} = \frac{\Delta \phi \lambda}{4\pi \delta y} = \frac{(2N+1)\lambda}{4\delta y}, \quad (4)$$

для светлых интерференционных полос

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\Delta \phi \lambda}{4\pi \delta x} = \frac{N\lambda}{2\delta x}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial w}{\partial y} = \frac{\Delta \phi \lambda}{4\pi \delta y} = \frac{N\lambda}{2\delta y}, \quad (6)$$

где N — порядок полосы.

Равенства (3)–(6) позволяют выполнять прямую оценку деформаций $\left(\frac{\partial w}{\partial x}, \frac{\partial w}{\partial y}\right)$ из плоскости объекта после определения порядка полосы.

Для оценки точности определения $\partial w/\partial x$ и $\partial w/\partial y$ методом электронной ширографии рассматривалась задача о перемещениях точек поверхности металлического диска, заземленного по контуру, под воздействием осевой нагрузки, аналитическое решение которой известно [5].

Для заземленного диска при нагружении его осевой нагрузкой по центру прогиб w равен:

$$w = \begin{cases} \frac{PR^2}{16\pi D}, & x^2 + y^2 = 0, \\ \frac{P}{16\pi D} [R^2 - (x^2 + y^2) + 2(x^2 + y^2) \ln \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{R}], & x^2 + y^2 \neq 0, \end{cases} \quad (7)$$

где P — нагрузка; $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$ — цилиндрическая жесткость; E — модуль упругости; ν — коэффициент Пуассона; h — толщина диска; R — радиус диска; x, y — координаты исследуемой точки на поверхности диска.

Продифференцировав уравнение (7) по x и y , получим выражение для производных от перемещений w по направлениям Ox и Oy :

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{Px}{4\pi D} \ln \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{R}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial w}{\partial y} = \frac{Py}{4\pi D} \ln \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{R}. \quad (9)$$

Из эксперимента $\partial w/\partial x$ и $\partial w/\partial y$ определяются по зависимостям (3)–(6).

При проведении исследований в качестве образца был выбран круглый алюминиевый диск ($E = 70000$ МПа, $\nu = 0,32$) диаметром 167 мм и толщиной 5,5 мм, зажатый по контуру в специальном нагрузочном устройстве. Заданные нагрузки измерялись динамометром и прикладывались по центру пластины нормально к ее поверхности со стороны, противоположной направлению наблюдения и освещения. Эксперименты выполнялись на компактной ширографической установке (рис. 2).

Точность определения производных $\partial w/\partial x$ с помощью ширографического метода, оценивалась сравнением результатов эксперимента с расчетными значениями, полученными по формуле (8). Расчетные значения производных выбирались в экстремальных точках достижения максимума и минимума, что соответствует координатам $x = -e^{\ln R - 1} = -0,368R$ (на расстоянии 30,7 мм от центра диска), $y = 0$. Экспериментальные значения производных определялись по количеству полос на широграмме согласно уравнению (3).

В экспериментальных исследованиях широдвиг δx изменялся в диапазоне 3...30 мм. Для $\delta x = 3$ мм первая интерференционная полоса на широграмме появлялась при $\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)_{\max} = 0,77 \cdot 10^{-4}$ ($P = 33,40$ Н). При увеличении нагрузки возрастает и количество интерференционных полос на широграмме. Установлено, что при автоматической компьютерной расшифровке широграммы оптимальное количество интерференционных полос равно четырем. При этом значение производной составляет $\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)_{\max} = 3,32 \cdot 10^{-4}$ ($P = 144,6$ Н) (рис. 3).

Графики изменения $\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)_{\max}$ вдоль оси Ox , построенные по расчетным значениям (кривая 1) и полученные экспериментально (кривая 2), показаны на рис. 4. Максимальные отклонения экспериментальных значений от расчетных не превышают 7 %.

Используемая ширографическая измерительная система для заданных параметров ($\delta x = 3$ мм, увеличение — 1,05) позволяет разрешить 10 ин-

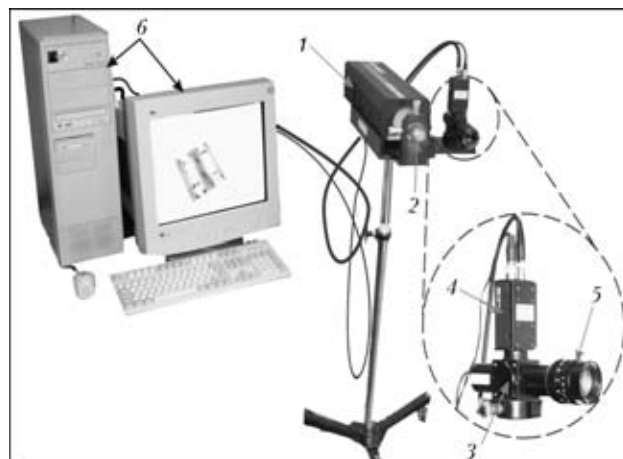


Рис. 2. Общий вид ширографической установки: 1 — лазер; 2 — расширяющая линза; 3 — ширографический модуль; 4 — CCD-камера; 5 — объектив; 6 — компьютер

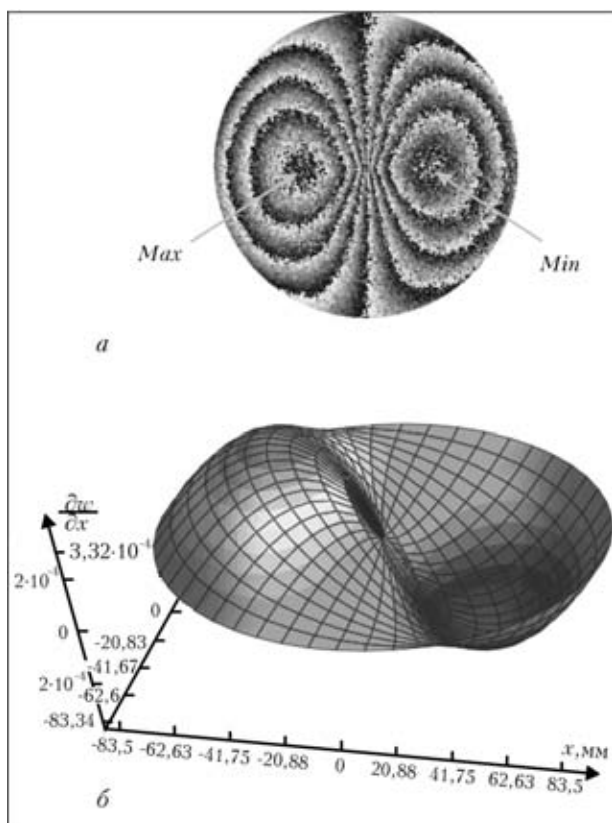


Рис. 3. Интерференционная картина полос (а), вызванная нагружением $P = 144,6 \text{ Н}$, $(\partial w / \partial x)_{\max} = 3,32 \cdot 10^{-4}$ и теоретическая трехмерная диаграмма изменения производной $\partial w / \partial x$ в точках поверхности диска (б)

терференционных полос, что соответствует $(\partial w / \partial x)_{\max} = 8,1 \cdot 10^{-4}$ ($P = 353,1 \text{ Н}$).

Декорреляция интерференционной картины на широграмме возникает при величине $(\partial w / \partial x)_{\max} = 17,99 \cdot 10^{-4}$ ($P = 784,0 \text{ Н}$). Использование в экспериментах ширсдвига $\delta x = 30 \text{ мм}$ позволяет зарегистрировать первую полосу при $(\partial w / \partial x)_{\max} = 0,088 \cdot 10^{-4}$. В рассматриваемом диапазоне изменения $\delta x = 3 \dots 30 \text{ мм}$, диапазон регистрируемых значений $(\partial w / \partial x)_{\max}$ составляет $17,99 \cdot 10^{-4} \dots 0,088 \cdot 10^{-4}$.

Разработанная технология ширографического НК качества использовалась для контроля качества натуральных элементов и узлов тонкостенных конструкций. Исследовалась цилиндрическая алюминиевая оболочка диаметром 500 мм, высотой 650 мм и толщиной стенки 5 мм (рис. 5, а). Нагружение оболочки осуществляли путем нагрева участка контроля направленной струей теплого воздуха ($\sim 60^\circ \text{C}$) в течение 20 с. Интерференционные картины полос и трехмерные картины деформирования, характеризующие качество сварного шва на контролируемых участках, приведены на рис. 5, б–д. Анализ картин показал, что на этих участках выявлены внутренние дефекты с линейными размерами 10 мм (рис. 5, в, д) и 25 мм (рис. 5, б, г). Дополнительные исследования показали, что в этих местах сварные швы выполнены с непроварами.

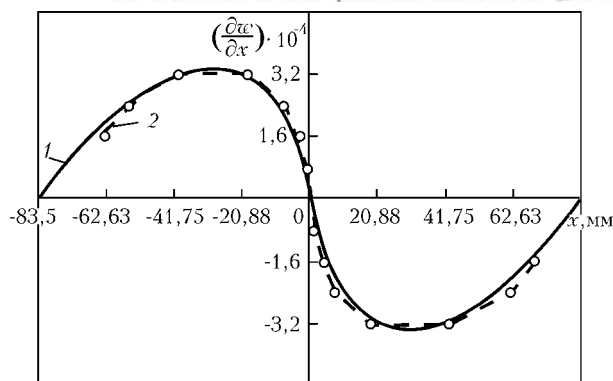


Рис. 4. Сравнение экспериментальной и расчетной кривых изменения $\partial w / \partial x$ по поверхности диска вдоль оси Ox : 1 — расчетные значения; 2 — экспериментальные значения

С помощью предложенной технологии выполнена оценка качества сварного алюминиевого трубчатого элемента диаметром 50 мм, толщиной стенки 3 мм, длиной 500 мм, который устанавливался в специальное устройство для крепления и нагружения (рис. 6, а). Сварной кольцевой шов трубчатого элемента на одном участке выполнялся с непроваром протяженностью $\sim 10 \text{ мм}$.

Для нагружения применялось механическое и температурное воздействие. При температурном нагружении исследуемый участок кольцевого сварного шва обдувался струей теплого воздуха ($\sim 60^\circ \text{C}$) в течение 15 с. Регистрация картин полос осуществлялась в процессе остывания исследуемого участка элемента. На рис. 6, а, б, в видна локальная зона деформирования участка шва (рис. 6, в), которая указывает на наличие внутреннего дефекта.

При механическом воздействии участок кольцевого сварного шва трубчатого элемента упруго изгибали (рис. 6, а). В результате в области дефекта образовалась зона локализации интерференционных полос (рис. 6, г) на фоне общего деформирования конструкции. Дальнейшая обработка широграммы позволила получить трехмерную картину деформирования (рис. 6, д).

С помощью разработанной технологии ширографического контроля исследовалось качество алюминиевой сотовой панели размером $200 \times 130 \times 7 \text{ мм}$, которая была изготовлена из двух алюминиевых листов толщиной 0,5 мм и сотового алюминиевого наполнителя. Размер одной соты составляет 49 мм^2 .

Панель была запаяна по контуру. Нагружение конструкции осуществляли путем изменения внутреннего давления на 0,5 кПа. В результате вы-

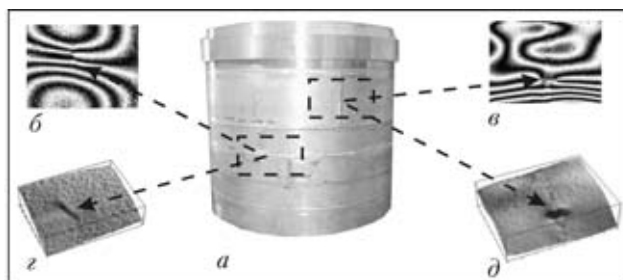


Рис. 5. Общий вид сварной алюминиевой оболочки (а), широграммы (б, в) и трехмерные картины деформирования (г, д)

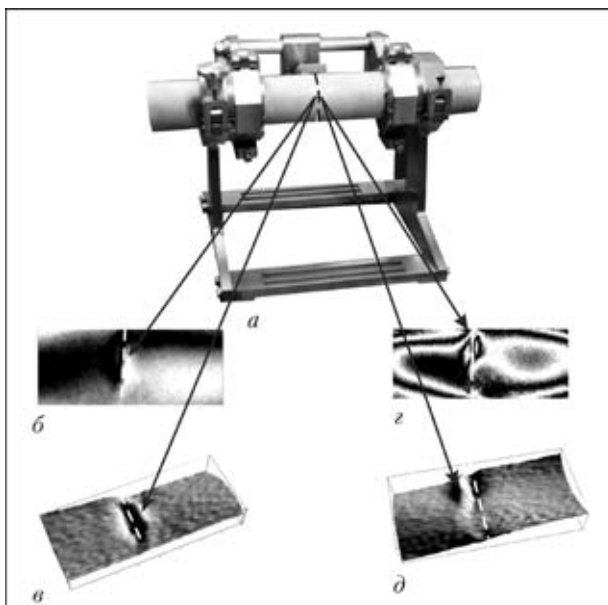


Рис. 6. Общий вид трубчатого элемента, расположенного в зажимном устройстве крепления и нагружения (а); широграмма и трехмерная картина деформирования (б, в), полученные при температурном нагружении; широграмма и трехмерная картина деформирования (г, д), полученные при механическом нагружении (штриховой линией показан сварной шов)

полнения экспериментальных исследований получили ширографическую картину, приведенную на рис. 7, а. Анализ показал, что на участках, где имеется качественное соединение заполнителя с наружным листом, в пределах каждой соты образовалась регулярная картина полос. В месте нарушения соединения интерференционные полосы замыкаются в пределах четырех сот (рис. 7, а). Дальнейшая обработка широграммы до получения трехмерной картины деформирования свидетельствует о наличии дефекта (рис. 7, б) на исследуемом участке.

Выполненные эксперименты по отработке и созданию технологии НК качества элементов и узлов конструкций методом электронной ширографии доказали, что применяемая компактная ширографическая система позволяет бесконтактно выполнять регистрацию деформаций $(\partial w / \partial x)_{\max}$ в диапазоне $17,99 \cdot 10^{-4} \dots 0,088 \cdot 10^{-4}$ при изменяемой величине широсдвига в пределах $\delta x = 3 \dots 30$ мм.

Выводы

Создана технология, которая при использовании оптимального нагружения (механического, температурного и т. п.) с учетом особенностей геометрии элементов конструкций и материалов контроля позволяет эффективно выявлять внутренние дефекты

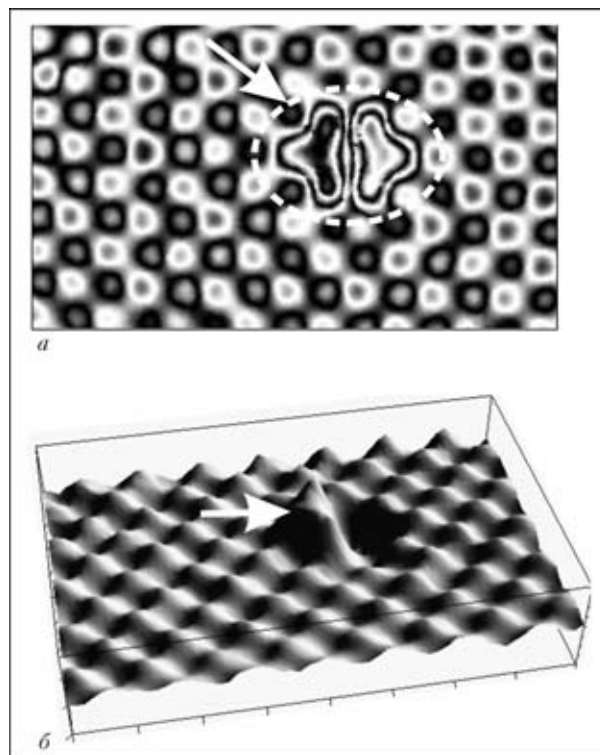


Рис. 7. Результат контроля сотовой панели размером $200 \times 130 \times 7$ мм: а — широграмма; б — трехмерная картина деформирования поверхности конструкции (стрелками указано место дефекта)

различного типа: непровары, трещины, непровары и другие несовершенства материала, которые при нагружении вызывают концентрацию деформаций. Полученные результаты контроля могут длительное время сохраняться в памяти компьютера и после эксплуатации объекта контроля на протяжении определенного времени можно проводить НК конструкций с целью определения дефектов, возникших в процессе эксплуатации.

1. *Trends in Optical Nondestructive Testing and Inspection* / P. K. Rastogi and D. I. Amsterdam-Lausanne, Elsevier. — 2000. — 633 p.
2. *Вест Ч.* Голографическая интерферометрия. — М.: Наука, 1982. — 504 с.
3. *Hung Y. Y., Wang J. Q., Hovanessian J. D.* Technique for Compensating Excessive Rigid Body Motion in Nondestructive Testing of Large Structures Using Shearography // *Opt. and Laser in Engineering*. — 1977. — 26. — P. 249–258.
4. *Hedser van Brug.* Phase-step calibration for phase-stepped interferometry // *Applied Optics*. — 1999. — 38, № 16. — P. 3549–3551.
5. *Тимошенко С. П.* Курс теории упругости. — Киев: Наук. думка, 1972. — 503 с.
6. *Состояние и перспективы применения метода электронной ширографии для диагностики элементов и узлов конструкций* / Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, Е. М. Олейник, И. В. Киянец // *Автомат. сварка*. — 1998. — № 11. — С. 26–31.

МЕТОД ЭМА-КОНТРОЛЯ ТРУБОПРОВОДОВ С ИЗОЛЯЦИОННЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

Ж. НИКИФОРЕНКО, А. БУЛАВИНОВ, В. ЯГЕР, Б. РОКШТРО, М. КРЕНИНГ, К. ЭЙШХОРН, Р. ЗАУЭР

Неразрушающий контроль систем трубопроводов в процессе эксплуатации — актуальная задача, требующая разработки новых методов контроля, ориентированных на текущее состояние объектов. Контроль сварных соединений в этом отношении — область относительно хорошо разработанная и подробно регламентированная. Что касается контроля «тела» трубы, т. е. участков от сварного шва до сварного шва, то в силу их большой протяженности и наличия различных антикоррозионных и изоляционных покрытий возможность их контроля ограничена.

Non-destructive testing of piping in operation is an urgent task, requiring development of new methods of control, oriented to the current condition of the plants. Control of welded joints in this respect is an area, which is relatively well-developed and specified in detail. As regards control of the pipe y, i.e. sections between welds, ability to control them is limited, in view of their large extent and presence of various anticorrosion and insulation coatings.

Введение. Унификация нормативных документов и их непрерывное развитие в соответствии с техническим прогрессом, а также растущее понимание того, что неразрушающий контроль (НК) вносит количественный вклад в надежность и безопасность эксплуатации технических сооружений — реалии сегодняшнего дня.

Современные направления развития систем НК характеризуются тенденцией к применению стратегий технического обслуживания, ориентированных на текущее состояние объектов [1]. Реализация таких стратегий позволяет оптимизировать сроки эксплуатации при сохранении эксплуатационной безопасности промышленных объектов. Разработка и последующее внедрение новых методик контроля является одной из наиболее актуальных задач.

Многообразие задач контроля требует технических решений, оптимизированных на объект и параметры контроля, такие, как материал и гео-

метрия изделия, тип дефекта, производительность контроля и т. п.

В данной работе будет представлен метод ультразвукового (УЗ) контроля, позволяющий за счет использования оригинальных технических решений выявлять коррозионные разрушения в изолированных трубопроводах.

Задача контроля. Коррозионное разрушение трубопроводов снаружи в местах касания с опорами или грунтом, а также вызываемое разъемом материала изнутри, например, вследствие образования и скопления конденсата — известная проблема. Основная трудность выявления таких разрушений связана не со сложностью задачи как таковой. Для выявления коррозии существует множество методов, в том числе УЗ. Значительно ограничена возможность применения этих методов на практике, когда внешние условия, либо сам объект не приспособлены для проведения контроля (труднодоступность, наличие изоляционных покрытий или загрязнение поверхности, большая

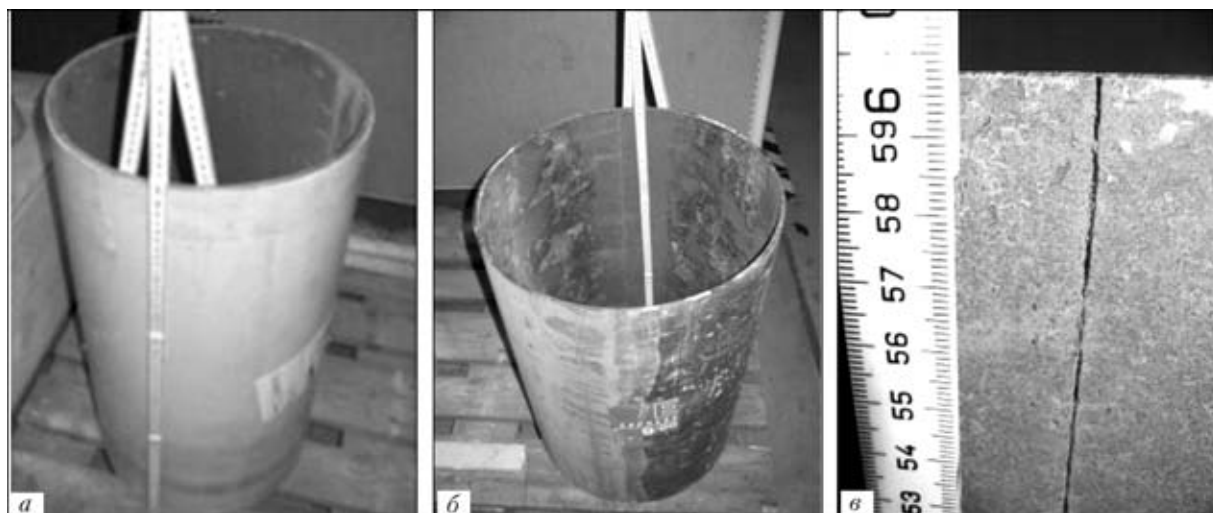


Рис. 1. Тест-образцы: а — отрезок новой трубы с пластиковым покрытием толщиной до 4,5 мм; б — отрезок трубы, бывшей в эксплуатации, со снятым покрытием, толщина стенки 6 мм; в — участок продольного сварного шва, пораженный «ручейковой» коррозией

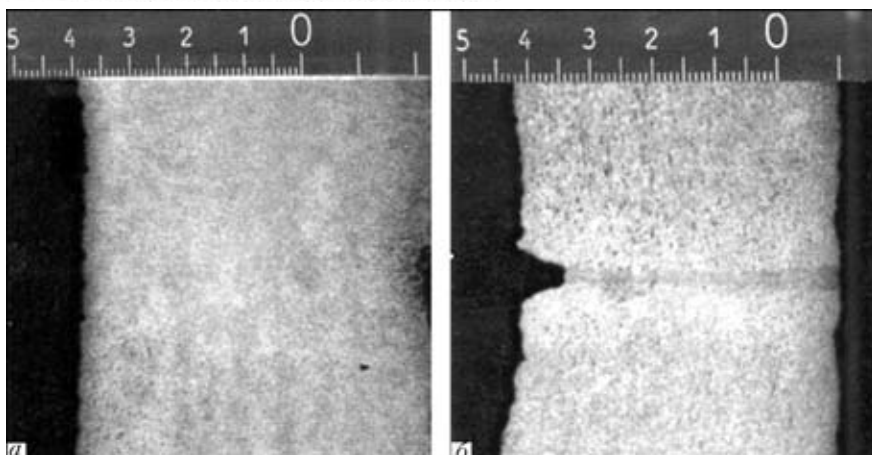


Рис. 2. Металлографическое исследование объекта контроля: а — металлографическое изображение области сварного шва новой трубы; б — металлографическое изображение области сварного шва, поврежденного коррозией

протяженность объекта, а также сложные климатические условия).

Во Фраунгоферовский институт IZFP обратился представитель нефтеперерабатывающего предприятия British Petroleum с просьбой разработать метод, позволяющий выявлять локальные коррозионные разрушения в трубопроводах системы охлаждения.

В качестве тест-образцов были представлены два отрезка трубы (рис. 1), дающие представление о задаче контроля.

По информации заказчика коррозионное разрушение развивается в нижней части трубопровода предположительно в месте продольного сварного шва. Трубы имеют пластиковое покрытие толщиной до 4,5 мм. Контроль должен проводиться с внешней стороны трубы без удаления покрытия.

Результаты металлографического исследования. Первоначально для оценки текстуры металла контролируемого объекта и возможности успешного решения задачи с помощью ультразвука было проведено металлографическое исследование пред-

ставленных образцов (рис. 2). Оно показало, что в обоих образцах отсутствуют валики усиления, материал сварного шва слабо отличается от основного материала, и имеется возможность получения эхосигналов только от участка, поврежденного коррозией.

Решение задачи контроля. В работах [2–5] описывались методики контроля труб и трубопроводов на большие расстояния, в которых применялись фазированные системы многоэлементных ЭМА-преобразователей и соответствующие методы обработки сигналов.

Первые работы, затрагивающие вопросы теории многоэлементных ЭМАП [6], показали принципиальную возможность возбуждения горизонтально-поляризованных волн в пластинах с помощью преобразователей такого типа.

Для проведения контроля волнами в ограниченных средах на расстояниях до нескольких десятков метров в IZFP были созданы низкочастотные многоэлементные ЭМА-преобразователи [2], позволяющие возбуждать моду SS0 на частотах порядка 50...250 кГц. В отличие от других мод, применяемых для решения данного класса задач, мода SS0 характеризуется отсутствием дисперсии. При отражениях от несплошностей материала практически не возникает ложных сигналов вследствие трансформации типов волн, характерных для классических волн Лэмба [8]. Данная мода наименее демпфируется изоляционными покрытиями на поверхности изделия, а также содержимым трубопровода. Еще одним преимуществом, присущим ЭМА-контролю в целом, является его бесконтактность, т. е. возможность в случае необходимости возбуждать и принимать ультразвуковые колебания через воздушный зазор или изолирующий слой.

В работах [2, 5, 9] описывается конструкция многоэлементного ЭМАП (рис. 3) как равномерной линейной фазированной решетки. Напомним здесь основные моменты. Преобразователь состоит из высокочастотной катушки, постоянных магнитов, замыкателя, медного экрана и проектора. На ВЧ-катушку подаются высокочастотные зондирующие импульсы. Они возбуждают электромагнитное поле, которое наводит вихревые токи в контролируемом электропроводном материале. Каждый постоянный магнит является локальным источником магнитного поля в материале контролируемого изделия. Вихревые токи, взаимодействуя с направленными по нормали к поверхности магнитными полями постоянных магнитов, создают локальные источники поперечнополяризованных УЗ SH_0 -волн. Последние распространяются в стенке трубы в двух противоположных направлениях, параллельных удлиненным сторонам ВЧ-катушки. При условии, что расстояние между постоянными магнитами равно половине длины волны

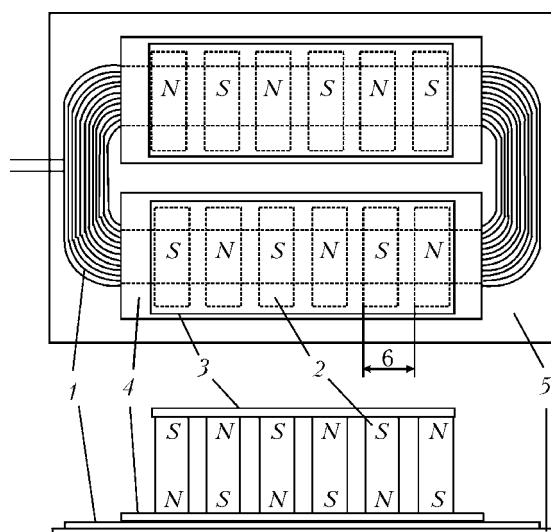


Рис. 3. Конструкция многоэлементного ЭМАП: 1 — ВЧ-катушка; 2 — постоянные магниты; 3 — ферромагнитный замыкатель; 4 — медный экран; 5 — проектор; 6 — расстояние между магнитами, соответствует половине длины волны возбуждаемых УЗ-колебаний

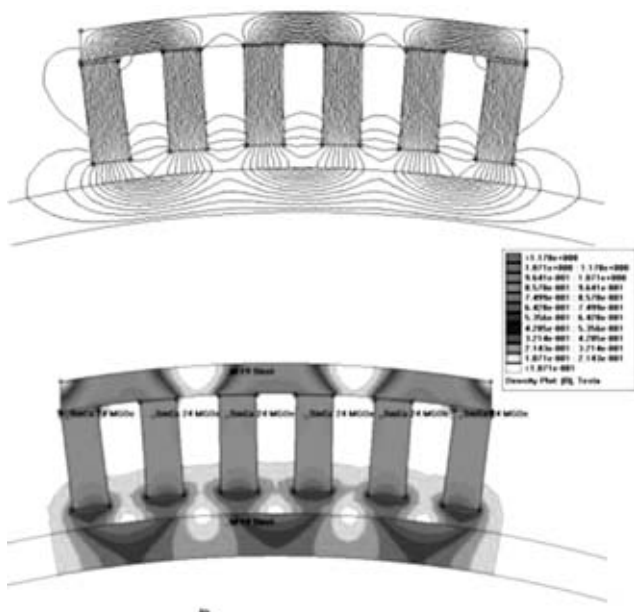


Рис. 4. Моделирование магнитной системы ЭМАП методом конечных элементов

ультразвука, колебания от различных локальных источников, распространяясь, совпадают по фазе. В результате их сложения амплитуда звукового давления результирующей УЗ волны возрастает пропорционально количеству магнитных каскадов. Обратный эффект наблюдается при приеме УЗ колебаний.

При УЗ контроле, в том числе волнами в ограниченных средах, наибольшая чувствительность достигается при нормальном падении на отражающую поверхность несплошности. В предлагаемой задаче контроля известным принимали расположение и ориентацию дефектов. Исходя из этого, выбрана схема прозвучивания по окружности трубы.

Необходимо было разработать специальный преобразователь или систему преобразователей, которые позволяют возбуждать УЗ волны в стенке трубы в окружном направлении и принимать эхосигналы, отраженные от дефекта.

В работе [9] с помощью моделирования методом конечных элементов показано, что оптимальное распределение магнитного поля (максимальное

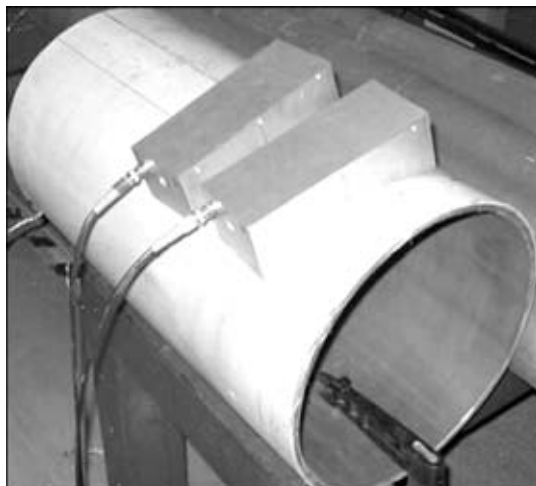


Рис. 5. Система ЭМАП на тест-образце

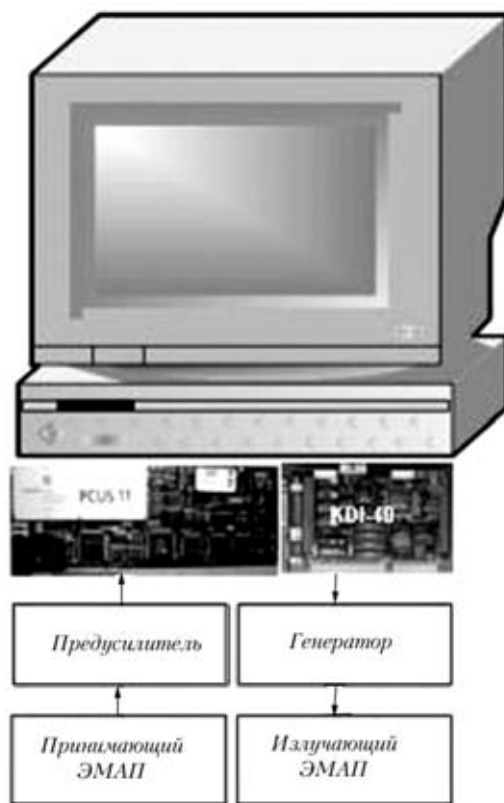


Рис. 6. Блок-схема электроники ЭМА-контроля

значение нормальной составляющей магнитной индукции, ее равномерное распределение на глубине) достигается при следующих условиях:

1) количество каскадов постоянных магнитов должно быть четным; 2) расстояние между соседними магнитами должно быть больше расстояния между магнитами и контролируемым объектом; 3) в магнитной системе должно использоваться ярмо (замыкатель), причем его толщина должна быть соизмерима с толщиной постоянных магнитов.

При соблюдении этих условий достигается минимальное рассеяние магнитного поля в прост-

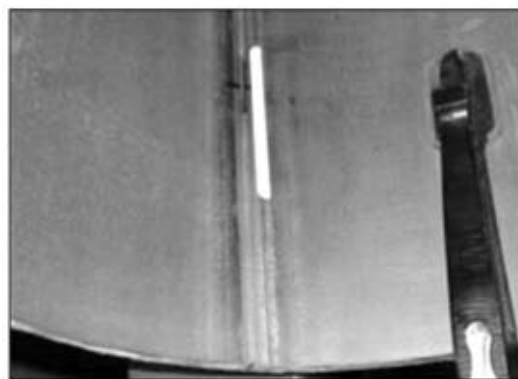
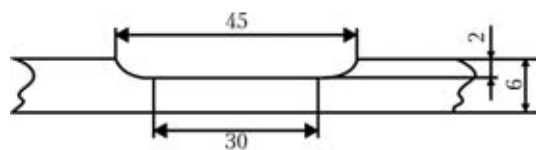


Рис. 7. Искусственный дефект в области сварного шва

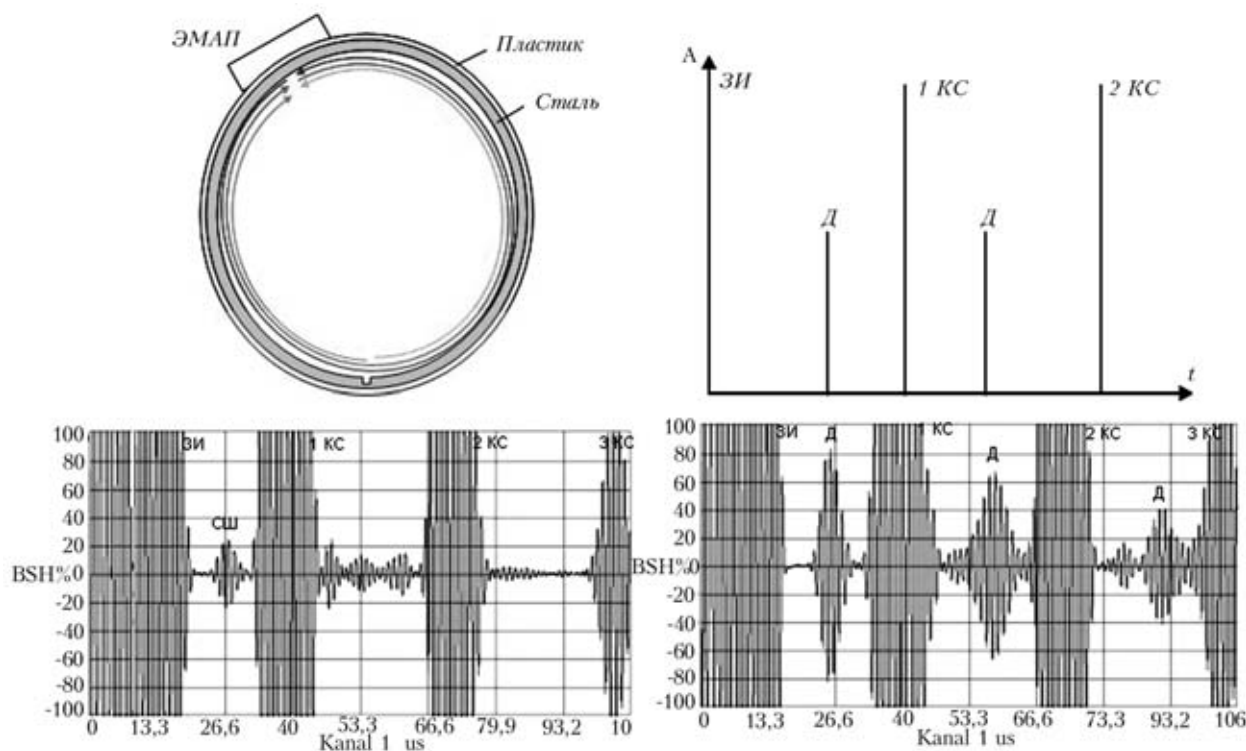


Рис. 8. Схема распространения УЗ-колебаний по окружности трубы с временной диаграммой и А-развертки с эхо-сигналами от сварного шва и от искусственного отражателя (ЗИ — зондирующий импульс; КС — кольцевой сигнал; Д — эхо-сигнал от дефекта; СШ — эхо-сигнал от сварного шва)

ранстве между магнитами (рис. 4), и, как следствие, повышается чувствительность ЭМАП. Только за счет оптимальной конструкции магнитной системы многоэлементного ЭМАП можно получить выигрыш в чувствительности до 50 %.

Кроме того, в работе [9] рассмотрены вопросы оптимизации длительности возбуждающего импульса с точки зрения фазовой накачки УЗ импульса, а также предложена модель расчета диаграммы направленности систем многоэлементных фазированных преобразователей.

С учетом этих результатов для решения предложенной задачи контроля была сконструирована система многоэлементных ЭМАП, оптимизированная под диаметр трубы 400 мм, толщину стенки 6 мм и толщину пластикового покрытия 4,5 мм (рис. 5), состоящая из одного излучающего и одного принимающего ЭМАП.

Для проведения испытаний и последующего контроля на предприятии заказчика была создана система контроля на базе стандартных модулей электроники IZFP (рис. 6). Специализированная интерфейсная карта PCUS11F, применяемая во многих системах контроля IZFP, была переработана для регистрации низкочастотных УЗ сигналов. Карта координатного интерфейса KDI40 использовалась для синхронизации PCUS11F и генератора импульсов тока, возбуждающего излучающий ЭМАП.

Результаты лабораторных испытаний. В представленном образце новой трубы в сварном шве был изготовлен искусственный отражатель в виде продольного пропила длиной 45 мм и глубиной

2 мм, что соответствует 30 % толщины стенки трубы (рис. 7).

Диаграмма направленности многоэлементного ЭМАП двунаправленная [8], т. е. ультразвук распространяется как по часовой, так и против часовой стрелки. Вне зависимости от положения излучающего и принимающего ЭМАП на временной развертке всегда будут кольцевые сигналы, являющиеся результатом сложения волн, распространяющихся в противоположных направлениях. Во избежание наложения кольцевых сигналов и сигналов от дефектов необходимо располагать систему ЭМАП на окружности трубы таким образом, чтобы предполагаемая дефектная зона располагалась на временной развертке между зондирующим и первым кольцевым сигналом (рис. 8, *вверху*).

На рис. 8, *внизу* представлены А-развертки УЗ сигналов, полученные на тест-образце новой трубы. На бездефектном участке между зондирующим импульсом и первым кольцевым сигналом можно наблюдать небольшой эхо-сигнал от сварного шва. При перемещении системы преобразователей на участок с пропилом, расположенным в нижней части трубы, на А-развертке возникает эхо-сигнал от искусственного дефекта. Соотношение между эхо-сигналом от сварного шва и сигналом от отражателя составляет порядка 12 дБ.

Аналогичные измерения были проведены на образце, бывшем в эксплуатации и имеющим натуральные дефекты (рис. 9).

Для имитации пластикового покрытия между ЭМАП и контролируемым объектом помещался четырехмиллиметровый слой материала, аналогич-

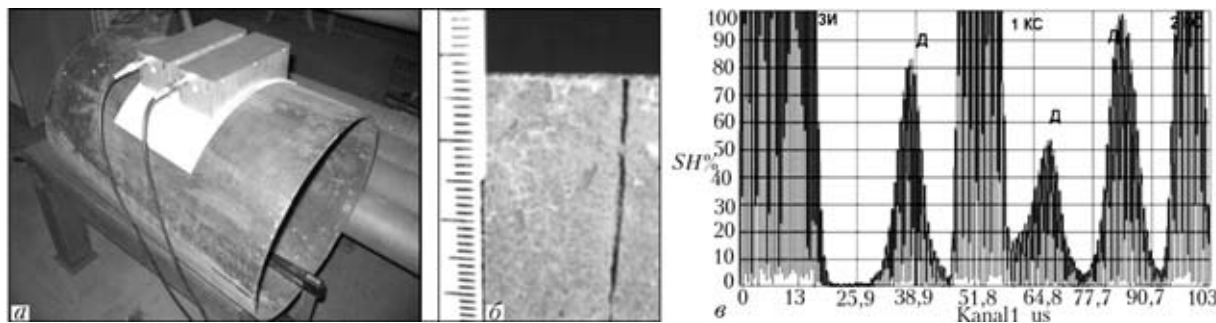


Рис. 9. Испытания на тест-образце с натуральным дефектом: а — ЭМАП на образце с натуральными дефектами; б — участок трубы с продольным дефектом; в — А-развертка с сигналом от дефекта



Рис. 10. Испытания на предприятии заказчика

ного по своим электромагнитным свойствам материалу изоляции. На рис. 9, в можно видеть, что эхо-сигнал от дефекта регистрируется с хорошим соотношением сигнал/шум.

Контроль труб на предприятии заказчика. После успешных испытаний в лабораторных условиях, показавших перспективность метода, заказчиком было предложено провести контроль не-

посредственно на объекте, где предполагалось наличие эксплуатационных дефектов.

Два участка трубопровода диаметром 350 и 400 мм необходимо было проверить с помощью разработанного метода (рис. 10). Система ЭМАП перемещалась линейным сканированием вдоль оси трубы, УЗ сигналы регистрировались с помощью лабораторной системы (рис. 11), расположенной на расстоянии 12 м от контролируемых объектов.

На рис. 12 приведены примеры А-разверток с показаниями, зарегистрированными на контролируемых трубопроводах. На двух отрезках общей длиной около 3 м было зарегистрировано девять условно дефектных участков.

После проведения ЭМА-контроля независимой фирмой была проведена верификация метода. Пластиковое покрытие было удалено с поверхности трубы, и выполнена толщинометрия с реконструкцией полной Т-развертки по всей длине контролируемых участков.

На участках, отмеченных как условно дефектные, были зарегистрированы коррозионные повреждения. Остаточная толщина стенки на участках, поврежденных коррозией, составляла до 30 % от номинального значения.

Таким образом, была доказана пригодность метода ЭМА-контроля для выявления локальных коррозионных разрушений в трубах и трубопроводах с изоляционными покрытиями.

Для проведения контроля трубопроводов различных объектов Фраунгоферовский институт IZFP разрабатывает мобильные системы контроля на базе собственных компонентов электроники и



Рис. 11. Лабораторная система контроля

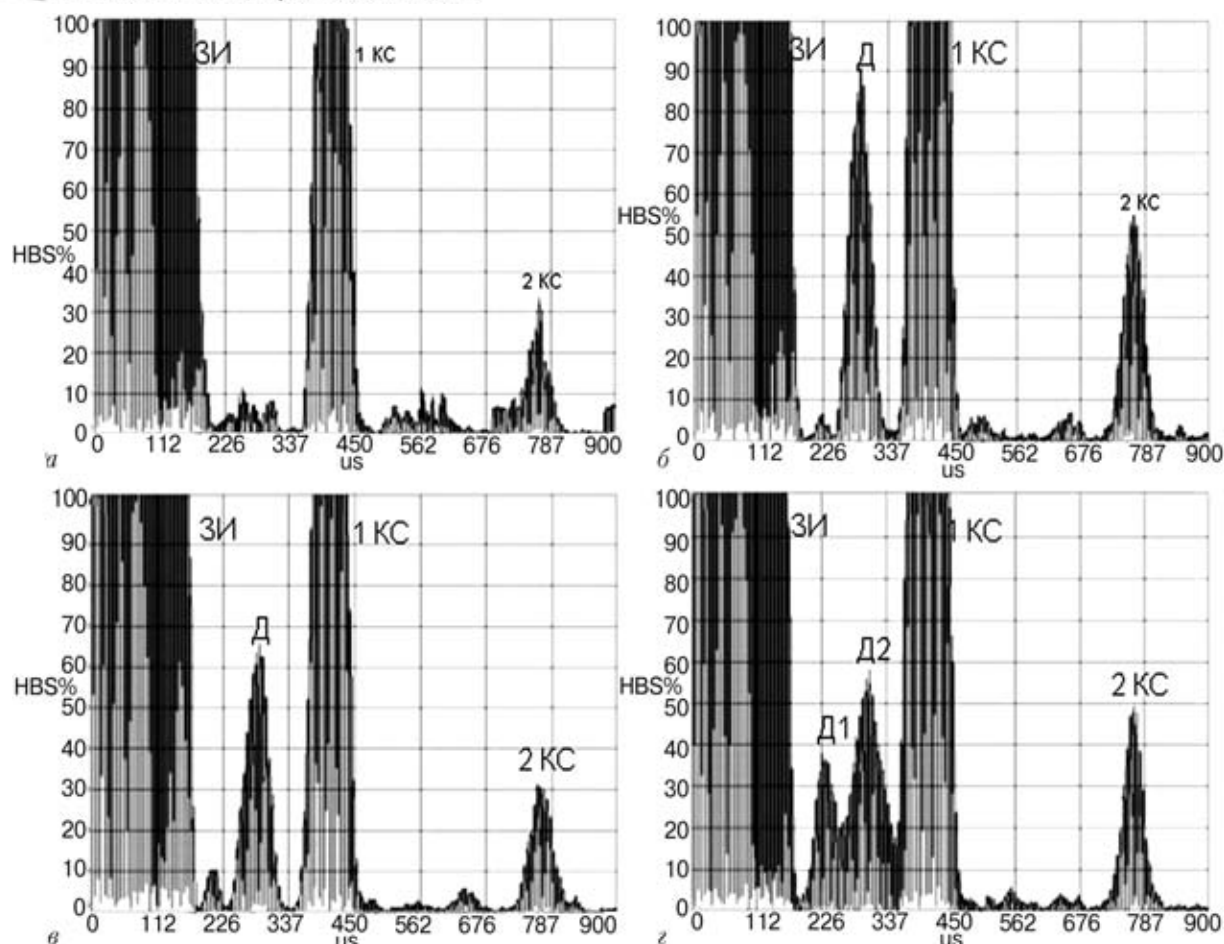


Рис. 12. Примеры А-разверток, зарегистрированных на реальном объекте контроля: а — А-развертка на бездефектном участке; б — А-развертка с показаниями (пример 1); в — А-развертка с показаниями (пример 2); г — А-развертка с показаниями (пример 3)

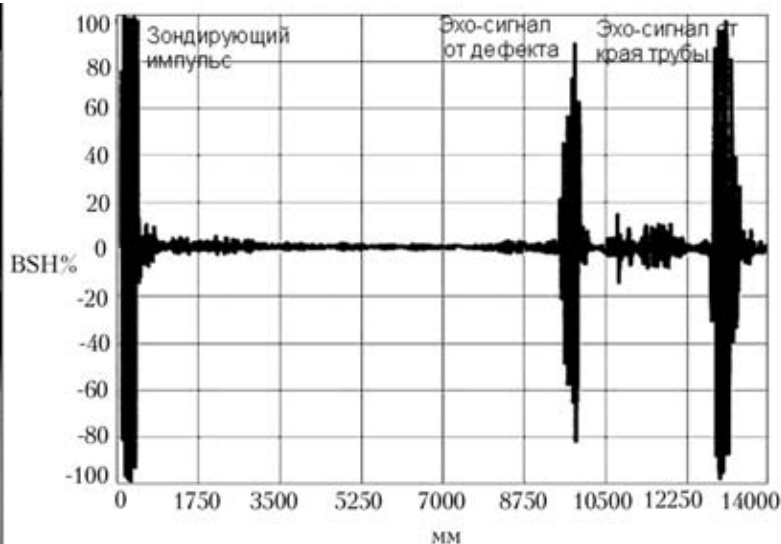


Рис. 13. Контроль труб УЗ волнами в ограниченных средах в продольном направлении. Выявление искусственного дефекта в виде пропила (50 % толщины стенки трубы) на расстоянии 10 м (а)

механики. Кроме контроля трубопроводов в окружном направлении имеются технологии ЭМА-контроля в продольном направлении (рис. 13) на расстояниях до 50 м [2–4].

Выводы

Описывается метод ЭМА-контроля коррозии в промышленных трубопроводах с изоляционными покрытиями. Контроль проводится волнами в ограниченных

средах (мода SS_0) путем прозвучивания по окружности трубы через покрытие толщиной до 5 мм.

В рамках разработки метода были сконструированы специальные многоэлементные ЭМАП, позволяющие возбуждать моду SS_0 на частотах порядка 50...250 кГц.

Приводятся результаты испытаний системы контроля в лабораторных и полевых условиях.

1. Горнев Ю. В., Шведов В. Н. Контроль и диагностика водопроводных трубопроводов. Проблемы, решения и перспективы // Контроль и диагностика. — 1999. — № 2.
2. Nikiforenko G., Boulavinov A., Kroning M., Rockstroh B. Vorrichtung und Verfahren zur Detektion von Materialdiskontinuitäten in einem Prüfkörper, Europäische Patentanmeldung Nr. 03020090.1.
3. Никифорова Ж. Г., Булавинов А. Н., Хюбиен Г., Кренинг М., Рокитро Б. Методы обработки сигналов фазированной системы ЭМА-преобразователей при контроле труб // Неразруш. контроль и диагностика. — 2002.

4. Никифорова Ж. Г., Булавинов А. Н., Рокитро Б., Кренинг М., Хюбиен Г. Новая концепция ЭМА-контроля газовых труб // Мат. конф. «Промышленный неразрушающий контроль», Москва, Апрель, 2003.
5. Boulavinov A., Kroning M., Nikiforenko G., Smorodinsky J. Phase Controlled EMAT Antenna for the Inspection of Coated Pipes, NDE 2002 National Seminar of ISNT, Chennai, 2002.
6. Никифорова Ж. Г., Булавинов А. Н., Рокитро Б., Ягер В., Рост П. УЗК литых аустенитных труб с помощью ЭМА-преобразователей // В мире неразруш. контроля. — 2003. — №1(19).
7. Пашутин А. В., Харитонов А. В. Некоторые вопросы теории электромагнитноакустических преобразователей нормальных волн, имеющих периодическию структуру // Известия ЛЭТИ. — 1975. — Вып. 168. — С. 12–19.
8. Cawley P. Practical Long Range Guided Wave Inspection — Applications to Pipes and Rail, NDE 2002 National Seminar of ISNT, Chennai, 2002.
9. Boulavinov A., Kroning M., Nikiforenko G., Rockstroh B., Jager W. Phasengesteuerte Systeme von EMUS-Multisenoren für die Ultraschallprüfung über grobe Entfernungen, DACHJahrestagung 2004, Salzburg, 17–19 Mai 2004.

Ин-т неразруш. контроля Браунгоферовского об-ва, Саарбрюкен, Германия

Поступила в редакцию
10.03.2004

V-й научно-технический семинар
«БЕЗОПАСНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ КОМПРЕССОРНОГО И НАСОСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ»
11–15 октября 2004 года, г. Одесса, Украина

Организаторы семинара:



Одесский Припортовый завод, г. Южный



ООО «ТРИЗ», г. Сумы



Ассоциация промышленного арматуростроения Украины

Ранее проводимые семинары подтвердили актуальность тематики и дали ощутимые практические результаты.

На семинар приглашаются руководители и представители заводов-производителей оборудования, механических и ремонтных служб предприятий химической промышленности Украины и ближнего зарубежья, а также предприятия и фирмы, имеющие практические результаты повышения надежности компрессорного и насосного оборудования отрасли.

Тематика семинара:

- поиск оптимальных решений обеспечения безопасной эксплуатации оборудования;
- усовершенствование системы технического обслуживания и управления ремонтами;
- выбор надежных поставщиков оборудования;
- содействие внедрению перспективных разработок;
- привлечение к сотрудничеству научных и машиностроительных фирм и предприятий;
- информационная деятельность, совершенствование нормативно-технической документации;
- обмен опытом решения общих проблем, деловое общение.

Для участия в семинаре необходимо перечислить на счет оргкомитета взнос-эквивалент \$200 за первого участника и 100\$ за каждого последующего или внести наличными в кассу при регистрации. Указанная сумма включает в себя расходы на организацию семинара и публикацию докладов.

Информационные спонсоры:

- + журнал «Химическая техника» г. Москва
- + журнал «Компрессорная техника и пневматика» г. Москва
- + журнал «Химическое и нефтегазовое машиностроение» г. Москва
- + журнал «Мир техники и технологий» г. Харьков
- + журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» г. Киев

Оргкомитет семинара

«ТРИЗ» АТД, ул. Машиностроителей, 1, 40020, г. Сумы, Украина

Для корреспонденции: а/я 1421

Тел.: (0542) 349-075, 349-076, Факс: (0542) 212-801, 349-075,

E-mail: triz@triz.sumy.ua

БЕЗКОНТАКТНИЙ КОНТРОЛЬ СТАНУ ІЗОЛЯЦІЙНОГО ПОКРИТТЯ ГАЛЬВАНІЧНО З'ЄДНАНИХ ПАРАЛЕЛЬНИХ ПРОМИСЛОВИХ НАФТОГАЗОПРОВОДІВ

А. В. ЯВОРСЬКИЙ, І. С. КІСІЛЬ

Запропоновано методику контролю стану ізоляційного покриття паралельних гальванічно зв'язаних нафтогазопроводів, які лежать на відстані, меншій за подвійну глибину залягання

A procedure is proposed for control of the condition of insulation coating in parallel galvanically coupled oil and gas pipelines, lying at a distance shorter that the double depth of the pipeline.

В даний час існує ряд методик безконтактного контролю стану ізоляційного покриття підземних нафтогазопроводів. Методики проведення контролю магістральних і промислових трубопроводів суттєво відрізняються між собою, оскільки в багатьох випадках промислові нафтогазопроводи гальванічно з'єднані і розміщуються на невеликій відстані один від одного (до 0,4 м) [1].

Найбільш перспективним безконтактним методом контролю стану ізоляційного покриття можна вважати електромагнітний метод, що базується на визначенні струму в стінках підземного нафтогазопроводу на різних його ділянках, в тому числі і із пошкодженою ізоляцією. Він оснований на вимірюванні напруженості магнітного поля на поверхні землі над контрольованим нафтогазопроводом.

Отримання достовірних даних під час проведення контролю таких трубопроводів електромагнітним методом досить складна задача, оскільки гальванічний контакт між ними приводить до того, що контрольований струм розповсюджується по паралельних трубопроводах і при невеликій відстані між ними в результаті інтерференційної взаємодії магнітних полів ускладнюється визначення положення осей контрольова-

них трубопроводів і отримання достовірних даних про величину струму в стінках цих трубопроводів.

В зоні контролю, крім цього, можуть бути потужні джерела промислових електромагнітних завад. Робота системи безконтактного контролю ізоляції трубопроводів (БКІТ) в умовах значних промислових електромагнітних завад описана в роботах [2, 3]. Однак уникнути впливу сторонніх комунікацій з використанням системи БКІТ не вдається у випадку наявності гальванічного контакту досліджуваного трубопроводу з іншими паралельними трубопроводами, які пролягають на невеликій відстані від нього (менше 2 м).

Характер напруженості магнітного поля при наявності двох гальванічно зв'язаних паралельних трубопроводів показано на рис. 1. Для прикладу, струми в трубопроводах 1 і 2 (I_1 , I_2) однакові. На рис. 1 зображено вплив відстані між трубопроводами на характер сумарної напруженості над ними. Якщо відстань між максимумами профілів напруженості H_1 і H_2 менша за деяке значення $L_{\min}$ (при відповідних значеннях струмів I_1 і I_2), то тоді пошук максимуму напруженості H_1 і відповідно вихід на вісь трубопроводу 1 є проблематичним через появу сумарного магнітного поля з напруженістю H_c (рис. 1, б).

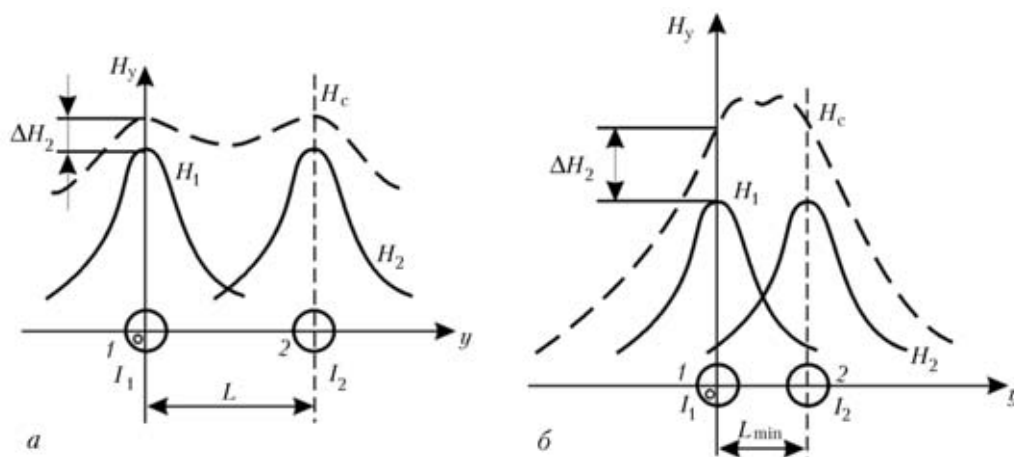


Рис. 1. Характер зміни напруженості магнітного поля над гальванічно з'єднаними паралельними трубопроводами



Похибку δ , зумовлену впливом сусіднього трубопроводу при безконтактному вимірюванні струму над досліджуваним трубопроводом, можна отримати за допомогою рівняння для паралельних циліндричних провідників [4]:

$$\delta = \frac{\Delta H_2}{H_{1\max}}, \quad (1)$$

де $H_{1\max}$ — максимальна напруженість магнітного поля в точці над віссю трубопроводу 1, викликана струмом I_1 ; ΔH_2 — напруженість магнітного поля в тій же точці над трубопроводом 1, викликана струмом I_2 .

Одна із методик безконтактного визначення струму в кожному з паралельних трубопроводів запропоновано в роботі [5]. Вона базується на використанні рівнянь, що описують профільні залежності модулів вертикальної H_z і горизонтальної H_y складових напруженості магнітного поля над двома паралельними підземними трубопроводами. Згідно роботи [5], достатньо проведення двох вимірювань відстаней між точками крайніх мінімумів вертикальної складової H_z магнітного поля, на основі яких можна здійснити розрахунок струмів в стінках трубопроводів, глибини їх залягання і відстані між ними. Для практичної реалізації задачі в цьому випадку потрібен тільки трасопошуковий пристрій. Але, незважаючи на свою простоту, таке рішення має ряд суттєвих недоліків, а саме: попередньо приймається, що струми в стінках трубопроводів рівні між собою (що рідко зустрічається на практиці внаслідок різного стану ізоляції, різної довжини і кількості додаткової арматури на кожному із трубопроводів). Вважається, що для реалізації методики

необхідно, щоб відстань між трубопроводами не була меншою за подвоєну глибину їх залягання.

Ця методика базується на використанні профільної залежності горизонтальної складової напруженості магнітного поля для двох трубопроводів [5]:

$$H_y = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{I_1 z_1}{z_1^2 + y_i^2} + \frac{I_2 z_2}{z_2^2 + (y_i - b)^2} \right), \quad (2)$$

де I_1, I_2 — струми в стінках трубопроводів 1 і 2; z_1, z_2 — глибини залягання відповідних трубопроводів; b — відстань між трубопроводами; y_i — абсциса профільної залежності (рис. 2).

Вираз (2) з достатньою для практики точністю описує залежність складової напруженості від параметрів (I_1, I_2, z_1, z_2, b) для частоти контрольованого сигналу, що не перевищує 1000 Гц [5, 6], при вимірюванні напруженості магнітного поля H_y в кожній точці з кроком $\Delta y = y_{i+1} - y_i$ над трубопроводами. Практичне використання залежності (2) ускладнюється тим, що без даних про положення одного із паралельних підземних трубопроводів неможливо встановити положення точки відліку, яка прив'язана до осі трубопроводу 1 (рис. 2).

Для усунення цього недоліку нами пропонується у вираз (2) ввести додатковий параметр d для компенсації невизначеності точки відліку, тобто:

$$H_y = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{I_1 z_1}{z_1^2 + (y_i^2 + d)^2} + \frac{I_2 z_2}{z_2^2 + (y_i - b + d)^2} \right), \quad (3)$$

де параметр d — відстань між точкою відліку, з якої починається вимірювання профілю, і віссю трубопроводу 1, який лежить найближче до точки відліку (рис. 3).

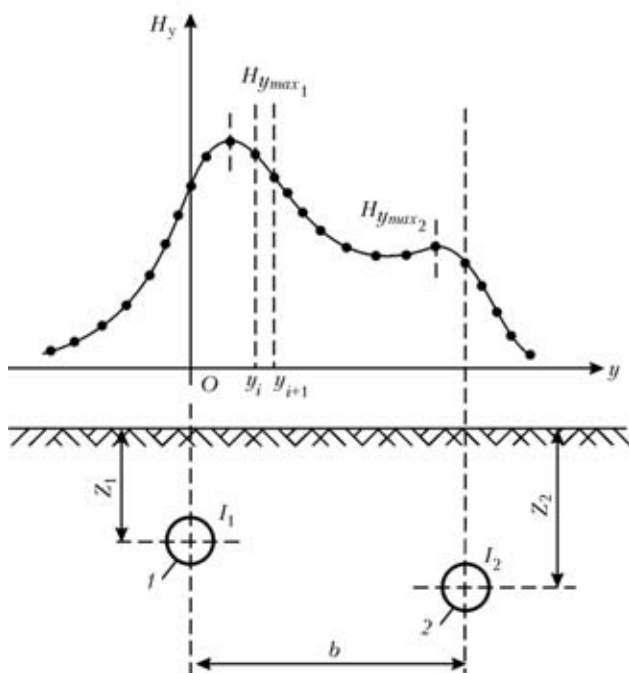


Рис. 2. Профільна залежність горизонтальної складової напруженості магнітного поля для двох паралельних підземних трубопроводів

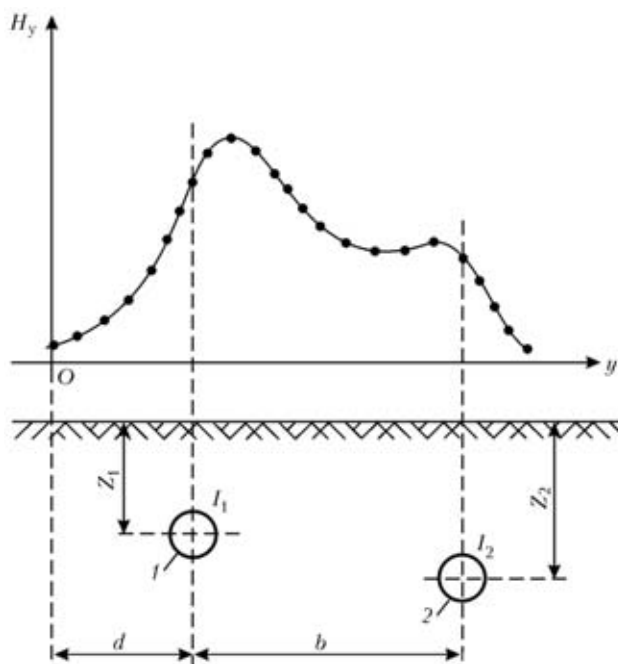


Рис. 3. Побудова профільної залежності горизонтальної складової магнітного поля для двох паралельних підземних трубопроводів з використанням зсуву d



Для визначення шуканих параметрів функції (3) $x = (I_1, I_2, z_1, z_2, b, d)$ можна використати методи мінімізації декількох функціоналів, таких, як середнього квадратичного відхилення, відносного відхилення, мінімуму максимального відхилення між теоретичними і експериментально отриманими значеннями. Теоретичні і експериментальні дослідження показали, що для даної задачі найбільш оптимальним є використання функціоналу метод середнього квадратичного відхилення, тобто:

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^N (H_{y_i} - \tilde{H}_{y_i})^2, \quad (4)$$

де H_{y_i} — теоретичні значення напруженості магнітного поля по профілю; $\tilde{H}_{y_i}$ — виміряні значення напруженості магнітного поля по профілю над досліджуваними трубопроводами.

Задача визначення параметрів в залежності (3) полягає в мінімізації функціоналу (4):

$$\sigma^2 \rightarrow \min_{I_1, I_2, z_1, z_2, b, d}. \quad (5)$$

Пряме використання методу мінімізації середнього квадратичного відхилення (5) може привести до отримання значень параметрів, які фізично не реалізуються (наприклад, перевищення величини струму в стінці трубопроводу або від'ємне значення заглиблення). Тому для визначення значень параметрів функції (3) потрібно вказати діапазон реальних значень шуканих параметрів. Для задачі визначення значень струмів в стінках двох гальванічно зв'язаних трубопроводів цей діапазон буде таким:

$$\begin{aligned} I_{\max} \geq I_1 \geq I_{\min}, \quad I_{\max} \geq I_2 \geq I_{\min}, \\ z_{\max} \geq z_1 \geq z_{\min}, \quad z_{\max} \geq z_2 \geq z_{\min}, \quad b_{\max} \geq b \geq b_{\min}. \end{aligned} \quad (6)$$

На параметр d обмеження не накладаються, оскільки він не впливає на формування магнітного поля над паралельними гальванічно зв'язаними трубопроводами. Обмеження (6) практично зводяться до такої системи рівнянь:

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{v}, \quad (7)$$

де $\mathbf{A}$ — матриця коефіцієнтів системи рівнянь; $\mathbf{x}$ — вектор параметрів функції (3); $\mathbf{v}$ — вектор граничних значень параметрів x ;

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{v} = \begin{bmatrix} I_{\max} \\ -I_{\min} \\ I_{\max} \\ -I_{\min} \\ z_{\max} \\ -z_{\min} \\ z_{\max} \\ -z_{\min} \\ b_{\max} \\ -b_{\min} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Задачу мінімізації функціоналу (4) з обмеженнями (по струму, по глибині, по відстані) можна вирішити за допомогою методу множників Лагранжа [7]. Функція Лагранжа для задачі визначення параметрів функції (3) буде мати такий вигляд:

$$F(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}, \mathbf{u}) = \sigma^2 + \sum_{i=1}^m \lambda_i [\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} - \mathbf{v}] + u_i^2, \quad (9)$$

де $\mathbf{x}$ — вектор параметрів функції; $\boldsymbol{\lambda}$ — вектор множників Лагранжа; $i = 1, \dots, m$, де $m = 10$ — кількість обмежень; u_i — послаблююча змінна.

Мінімізація функції (9) зводиться до вирішення такої системи рівнянь:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma^2}{\partial x_j} + \sum_i^n \lambda_i \frac{\partial (\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} - \mathbf{v})}{\partial x_j} &= 0, \\ \mathbf{v}_{\min} + \mathbf{u}^2 &= 0, \quad \mathbf{v}_{\max} + \mathbf{u}^2 = 0, \\ \lambda [\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} - \mathbf{v}_{\min}] &= 0, \quad \lambda [\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} - \mathbf{v}_{\max}] = 0, \quad 2\lambda_i u_i = 0, \end{aligned} \quad (10)$$

де $j = 1, \dots, n$; $n = 16$ — кількість параметрів; $\mathbf{v}_{\min}$ — відноситься до мінімальних значень параметрів; $\mathbf{v}_{\max}$ — відповідно до максимальних значень.

Значення параметрів функції (3) можна знайти шляхом вирішення системи рівнянь (10). Однак система рівнянь (10) досить складна (кількість рівнянь — 16). Нелінійність цих рівнянь практично не дозволяє аналітичне вирішення її, а потребує застосування чисельних методів, що вимагає досить потужних обчислювальних засобів.

Крім методу множників Лагранжа для знаходження параметрів функції (3) з обмеженнями (7) можна застосувати методи прямого пошуку мінімуму функціоналу (4). Найбільш придатними для даної задачі є метод градієнта (метод спуску) і метод комплексів Бокса.

Сутність методу градієнта полягає в послідовному пошуку точок в просторі параметрів функції, для якої шукається екстремум [7], а саме

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + a_k \cdot \mathbf{P}_k, \quad (11)$$

де $\mathbf{P}_k$ — вектор, що визначає напрям спуску; a_k — величина кроку пошуку точок; k — номер ітерації, $k = 0, 1, 2$. При цьому точки $\mathbf{x}_k$ визначаються так, щоб для них виконувалися всі задані обмеження.

Для пошуку параметрів функції Лагранжа (9) засновано метод градієнта

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + a_k F'(\mathbf{x}_k), \quad (12)$$

де $F'(\mathbf{x}_k)$ — градієнт функції $F(\mathbf{x})$ в точці $\mathbf{x}_k$,

$$F'(\mathbf{x})_k = \left(\frac{\partial F(\mathbf{x})}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial F(\mathbf{x})}{\partial x_{16}} \right)^T.$$

У випадку, коли точка $\mathbf{x}_k$ виходить за границю допустимої області, антиградієнт проектується на площину, які апроксимують ділянку границі поблизу точки $\mathbf{x}_k$. Після цього проводиться пошук точки $\mathbf{x}_{k+1}$ такої, що $F(\mathbf{x}_{k+1}) < F(\mathbf{x}_k)$.

Загалом, метод градієнту складається з наступних операцій: 1) в точці $\mathbf{x}_k$ визначається напрям спуску $\mathbf{P}_k$; 2) знаходиться величина кроку a_k ; 3) визначається нове наближення параметрів функції (3).

Метод градієнту має високу точність, але повільну збіжність, що вимагає високої потужності обчислювальних засобів. Даний метод пошуку параметрів доцільно використовувати для точного визначення стану ізоляційного покриття паралельних трубопроводів при проведенні планово-регламентного контролю.

Метод комплексів Бокса — це різновид методу багатогранників, що деформуються [7]. Для пошуку екстремуму функції $\sigma^2(\mathbf{x})$ (4) в шестивимірному просторі параметрів функції $\mathbf{x}$ (3) будуються багатогранники, які складаються з $n + 1 = 7$ вершин (точок в просторі параметрів). Відповідно координати багатогранника будуть такими:

$$x[j, k] = (x_1[j, k], \dots, x_6[j, k])^T, \quad (13)$$

де j — номер точки в комплексі, $j = 1, 2, \dots, 7$; k — номер ітерації, $k = 0, 1, 2$.

Алгоритм комплексного методу полягає в наступному. Визначається початкова точка $x[1, 0]$ в області допустимих значень параметрів функції (6). Далі потрібно вибрати шість точок, що відповідають обмеженням. Координати даних шести вершин визначаються наступним чином:

$$x_i[j, 0] = \mathbf{a}_i + \mathbf{r}_i(\mathbf{p}_i - \mathbf{a}_i), \quad i = 1, 2, \dots, 6, j = 2, 3, \dots, 7, \quad (14)$$

де $\mathbf{a}_i$ — обмеження на мінімальні значення параметрів; $\mathbf{p}_i$ — обмеження на максимальні значення параметрів функції (3); $\mathbf{r}_i$ — псевдовипадкове число, рівномірно розподілене на інтервалі $[0, 1]$. На основі отриманих координат вершин багатогранника розраховується значення функції $\sigma^2(\mathbf{x})$ для кожної точки. З усіх розрахованих значень функції вибирається максимальне:

$$\sigma^2(x[h, k]) = \max\{\sigma^2(x[1, k]), \dots, \sigma^2(x[7, k])\}. \quad (15)$$

Наступним кроком є розрахунок центра ваги багатогранника:

$$x_i[l, k] = \frac{1}{7} \left(\sum_{j=1}^7 x_j[l, k] - x_i[l, k] \right), \quad i = 1, 2, \dots, 6. \quad (16)$$

На кожній ітерації замінюється вершина $x[h, k]$, в якій значення функції має найбільшу величину. Для цього $x[h, k]$ відбивається відносно центру ваги $x[l, k]$ багатогранника. Точка $x[m, k]$, що замінює вершину $x[h, k]$, визначається за формулою:

$$x[p, k] = (a + 1)[l, k] + a[h, k], \quad (17)$$

де $a > 0$ — коефіцієнт відбиття, найбільш прийнятні дає значення $a = 1, 3$. При цьому нові вершини

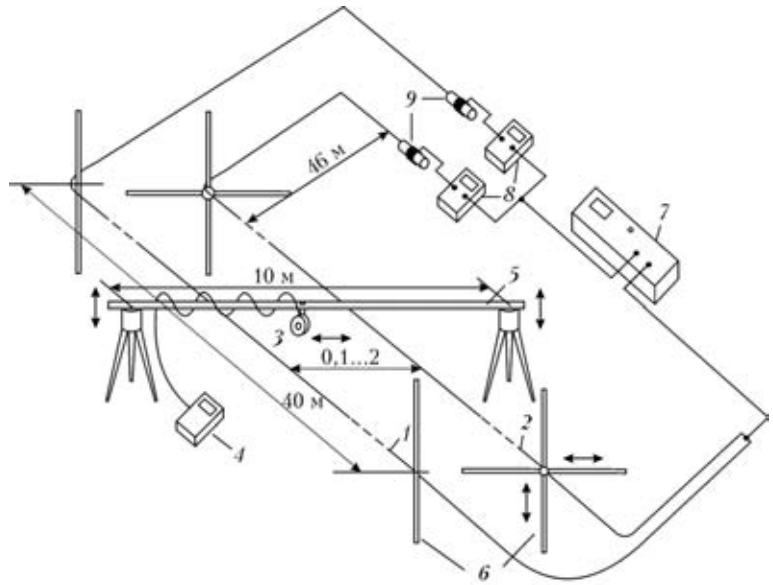


Рис. 4. Схематичне зображення експериментальної установки

багатогранника відшукуються за невелику кількість кроків, а значення функції $\sigma^2(\mathbf{x})$ зменшується достатньо швидко. Якщо $\sigma^2(x[p, k]) > \sigma^2(x[h, k])$, тоді коефіцієнт відбиття зменшується вдвічі до того моменту, поки точка $x[p, k]$ не стане допустимою. Пошук закінчується, якщо значення функції мало змінюється на протязі п'яти послідовних ітерацій:

$$|\sigma^2(x[l, k+1]) - \sigma^2(x[l, k])| \leq \epsilon, \quad k = 1, 2, \dots, 5, \quad (18)$$

де ϵ — задана константа. В цьому випадку координати центру ваги багатогранника є шуканими параметрами.

Перевагами методу комплексів Бокса є його простота, зручність для програмування, надійність в роботі, використання тільки значень функції (4) і обмежень (6). Таким чином, метод комплексів Бокса може бути реалізований для малопотужних обчислювальних засобів, які входять до складу вимірювальних пристроїв.

Запропонована залежність (3) також може бути застосована і для більшої кількості, ніж два паралельних гальванічно з'єднаних трубопроводів:

$$H_y = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{I_1 z_1}{z_1^2 + (y_1 + d)^2} + \sum_{j=2}^n \frac{I_j z_j}{z_j^2 + (y_j - b_{j-1} + d)^2} \right), \quad (19)$$

де n — кількість паралельних трубопроводів; b_j — відстань між трубопроводом 1 (що знаходиться найближче до точки відліку) і j -м трубопроводом при $j = 2, \dots, n$.

На основі наведеного вище пропонується методика контролю ізоляційного покриття гальванічно з'єднаних паралельних трубопроводів, суть якої полягає в наступному.

На певній відстані від орієнтовної траси пролягання паралельних трубопроводів вибирається точка відліку, починаючи з якої з певним кроком вимірюються значення горизонтальної складової напруженості магнітного поля над трубопроводами. Вимірювання проводиться в напрямку, перпендикулярному трасі пролягання трубопроводів,

Результати експериментальних досліджень, проведених на лабораторній установці

Величина, одиниця виміру	Задані значення			Визначені величини					
				градієнтний метод найшвидшого спуску			метод комплексів Бокса		
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 1	№ 2	№ 3	№ 1	№ 2	№ 3
I_1 , А	0,080	0,045	0,045	0,083	0,048	0,047	0,090	0,05	0,04
I_2 , А	0,060	0,080	0,090	0,068	0,080	0,090	0,072	0,072	0,082
z_1 , м	0,200	0,140	0,200	0,210	0,140	0,150	0,230	0,18	0,16
z_2 , м	0,200	0,200	0,250	0,240	0,210	0,30	0,220	0,16	0,23
b , м	0,400	0,350	0,350	0,440	0,310	0,290	0,350	0,35	0,40
d , м	0,300	0,250	0,180	0,250	0,210	0,200	0,320	0,28	0,16

Примітка. № 1–3 — номери експерименту.

до точки, яка лежить на протилежній стороні від траси по відношенню до точки відліку.

Значення сили струму в стінках кожного з трубопроводів, значення глибини їх залягання і відстані між ними визначається на основі отриманої профільної залежності напруженості магнітного поля. Визначення параметрів проводиться або безпосередньо на місці контролю із застосуванням чисельного методу комплексів Бокса, або в стаціонарних умовах з вищою точністю із застосуванням градієнтного методу найшвидшого спуску.

Для перевірки запропонованої методики безконтактного визначення вище наведених параметрів для гальванічно з'єднаних паралельних трубопроводів була розроблена експериментальна установка, схема якої представлена на рис. 4.

Для моделювання трубопроводів використовуються два циліндричні провідники 1 і 2, які закріплені на стояках 6. Провідник 2 може переміщуватись по горизонталі і вертикалі. Визначення горизонтальної складової напруженості магнітного поля, що необхідна для побудови профільної залежності, здійснюється за допомогою магнітної антени 3. Безпосереднє відображення значення напруженості поля здійснюється вторинним пристроєм 4. Магнітна антена переміщується над провідниками 1, 2 за допомогою пристрою 5. Джерелом синусоїдального сигналу служить генератор 7; з метою підвищення завадозахисту частота контрольного сигналу генератора становить 477 Гц. Контроль величини струму сигналу в кожному з провідників здійснюється за допомогою цифрових амперметрів 8. Струм в кожному провіднику задається реостатами 9.

З метою отримання профілю горизонтальної складової напруженості магнітного поля магнітна антена 3 переміщувалась перпендикулярно до осей паралельних провідників 1, 2 з кроком 0,05 м. В результаті вимірювань були отримані профільні

залежності для різних наборів значень струму в провідниках (I_1 , I_2), а також відстані від осі кожного провідника до перекладки пристрою переміщення 5 (z_1 , z_2), що імітує поверхню землі, і відстані між провідниками b . Для пошуку параметрів використовувався градієнтний метод найшвидшого спуску і метод комплексів Бокса. Результати проведених експериментальних досліджень ілюструє таблиця.

Проведені експериментальні дослідження показали адекватність запропонованої математичної моделі фізичним процесам утворення магнітного поля навколо паралельних гальванічно зв'язаних трубопроводів і достатню для практичного застосування точність визначення значень струмів, що протікають в стінках даних трубопроводів. Описана вище методика для свого застосування на практиці не вимагає визначення точного положення осі кожного з трубопроводів, завдяки введенню додаткового параметру зсуву.

1. Джала Р. М. Электромагнитні обстеження і контроль корозії підземних трубопроводів // Механіка руйнування та міцність матеріалів: Довід. посібник. Т. 5. — Львів: ФМІ НАНУ. — 2001. — С. 307–318.
2. Ващишак С. П., Яворський А. В. Вдосконалення приладу для безконтактного контролю стану ізоляційного покриття підземних нафтогазопроводів // Методи і прилади контролю якості. — 2000. — № 6. — С. 25–28.
3. Ващишак С. П., Яворський А. В. Система безконтактного контролю стану ізоляційного покриття підземних нафтогазопроводів в умовах значних промислових завад // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. — Праці НК, Хмельницький, 31 травня — 3 червня 2001 р.
4. Яковлев И. И. Бесконтактные электроизмерительные приборы. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 256 с.
5. Дослідження магнітного поля паралельних трубопроводів, збуджених струмами низької частоти / Р. М. Джала, Л. А. Мізюк, О. П. Максименко, О. І. Сенюк // Методи і прилади контролю якості. — 1999. — № 4. — С. 3–6.
6. Гордиенко В. И., Ярошевский Е. В. Электромагнитное обнаружение инженерных коммуникаций и локальных аномалий. — Киев: Наук. думка, 1981. — 227 с.
7. Банди Б. Методы оптимизации. — М.: Радио и связь, 1988. — 128 с.



ТОМОГРАФИЧЕСКАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ И КОНТРОЛЬ ТОЛЩИНЫ СТенок ТРУБ ПО ОГРАНИЧЕННЫМ РЕНТГЕНОВСКИМ ДАННЫМ

В. Л. ВЕНГРИНОВИЧ, С. А. ЗОЛОТАРЕВ, У. ЕВЕРТ, Б. РЕДМЕР, Г.-Р. ТИЛЛАК

Рассмотрена новая компьютерная технология для реконструкции изображений труб по рентгеновским проекциям в ограниченном угле обзора для зашумленных данных. Она позволяет осуществлять точное измерение толщины стенок трубы и параметров дефектов сплошности. Описана механизированная радиометрическая система, предназначенная для неразрушающего контроля кольцевых сварных швов. Показано, что использование принципа слияния данных для планарной томографии позволяет существенно повысить информативность и надежность производственной экспертизы труб.

A new computer technology is considered for reconstruction of pipe images by X-ray projections and limited viewing angle for noisy data. It allows taking accurate measurements of the wall thickness of the pipe and parameters of continuity defects. A mechanized radiometric system is described, which is designed for nondestructive testing of circular welds. It is shown that use of the principle of data merging for planar tomography allows a significant increase of the information content and reliability of production examination of pipes.

В ряде промышленных отраслей, таких, как химическая и нефтехимическая, энергетика, трубопроводный транспорт и др. определение толщины стенок транспортирующих труб, а также выявление дефектов сплошности труб является проблемой жизнеспособности конструкции и ее безопасной эксплуатации [1]. Часто для получения этих оценок приходится применять несколько методов неразрушающего контроля (НК), например, вихретоковый, ультразвуковой и рентгеновский.

Все рассмотренные методы, кроме основанных на рентгенографии [2, 3], можно применять только с датчиками, которые или непосредственно вставлены в контролируемую трубу, или имеется возможность прямого контакта с наружной поверхностью трубы [4, 5]. Рентгеновская радиография позволяет бесконтактно обследовать внешнюю и внутреннюю поверхности трубы, однако точные оценки коррозионных и других повреждений по данным радиограмм невозможны. Рентгенографические методы дают лишь плоское изображение объемной картины и поэтому оценки, производимые с их помощью, являются весьма приближенными. Проблема могла бы быть решена путем получения и анализа трехмерных томографических изображений труб, однако классическая компьютерная томография (КТ) не применима при ограниченном доступе к трубе — случай, реально имеющий место на практике. Наибольшее применение в рамках поставленной задачи — тотальной толщинометрии — имеет ультразвук, однако трудоемкость метода при работе с большими поверхностями трубы и необходимость хорошего контакта датчика с поверхностью ограничивают область его применения. Пленочная и цифровая рентгеноскопия также возможны, но из-за указанных ограничений и необходимости использования мощного источника γ -излучения, например, Ir-192 с

малым периодом полураспада, не нашли пока широкого применения.

Указанные ограничения целиком распространяются на дефектоскопию кольцевых сварных соединений труб. Необходимость прямого контакта, большая трудоемкость, ограниченность доступа и неопределенность количественных оценок дефектов значительно снижают эффективность применения рентгенографических, ультразвуковых и электромагнитных технологий.

Развитие новых методов реконструкции двумерных и трехмерных изображений и томографической визуализации, основанной, например, на принципах многоступенчатой томографии (МСТ), использующей малое число проекций и ограниченный угол обзора [4, 6, 7], является целью данной статьи.

Принципиальными препятствиями для прямого применения МСТ являются:

отсутствие специального оборудования, позволяющего получать необходимые проекции за экономически обоснованный промежуток времени;

отсутствие рациональной компьютерной технологии для реконструкции изображения трубы при ее сквозном просвечивании вследствие значительных эффектов вырождения и неопределенности из-за ограниченного доступа к трубе.

В последнее время в Федеральном институте материаловедения и испытаний (ВАМ, Берлин) разработана механизированная радиометрическая система, адаптированная к широкому диапазону диаметров труб и позволяющая в автоматическом режиме получать набор плоских рентгеновских изображений продольных сечений трубы в угле обзора 400...450° [2]. Поскольку описанные ниже вычислительные алгоритмы и программное обеспечение проверялись, как правило, на разработанной в ВАМ томографической системе для ме-

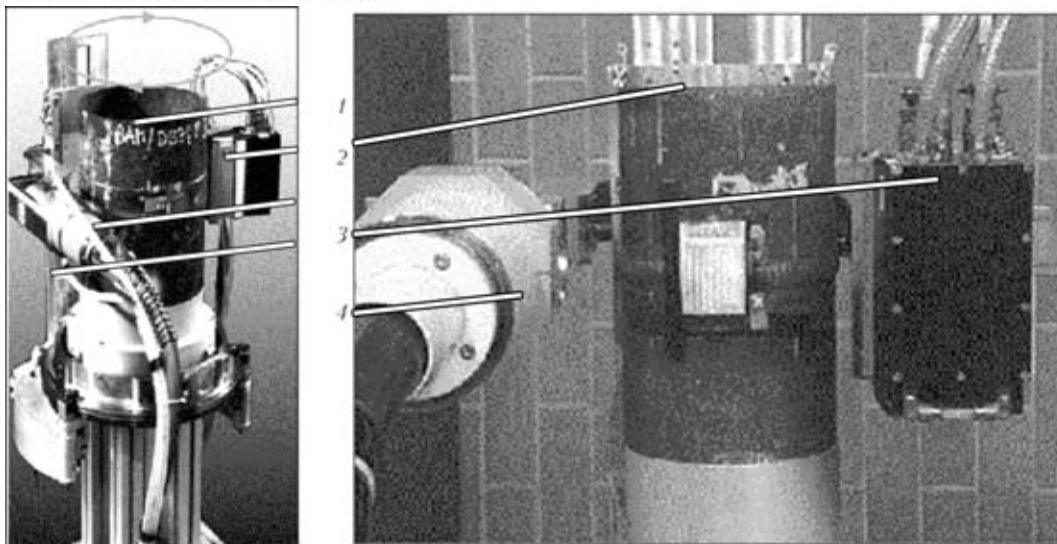


Рис. 1. Томографическая компьютерная установка для механизированной радиометрии: 1 — тестируемая труба; 2 — линейный детектор; 3 — рентгеновская трубка; 4 — манипулятор

ханизированной радиометрии (ТомоCAR), мы приведем здесь краткое описание и принцип действия данной установки. Внешний вид установки показан на рис. 1. Механизированная радиометрическая система создана для осмотра кольцевых швов и производственной экспертизы аустенитных и ферритных труб. Основной ее задачей является обнаружение и установление размеров трещин. Рентгеновская трубка и линейка детекторов устанавливаются на контролируемую трубу через угол в 180° , так, чтобы круговой сварной шов мог быть отсканирован при синхронном вращательном движении рентгеновской трубки и линейной матрицы детекторов. Круговое сканирование обеспечивает достаточное количество информации для трехмерной реконструкции структуры сварного шва. Могут контролироваться трубы диаметром от 176 до 500 мм. Манипулятор устанавливается на тестируемую трубу и крепится к ней ремнями. Все дальнейшие операции выполняются с использованием автоматизированной системы управления и аппаратных средств сбора данных. Максимальный угол обзора при круговой схеме сбора данных составляет 90° . Масса манипулятора составляет приблизительно 15 кг, рентгеновской трубки — около 11 кг, линейной матрицы детекторов — 2 кг. Размер пикселя равен 83 мкм при 1856 пикселях в линейке детекторов, энергия рентгенов-

кой трубки — 225 кВт, размер фокусного пятна — 0,4 или 1,5 мм. Для достижения более высокой точности измерения толщины стенок труб может быть использован принцип планарной томографии. С этой целью рентгеновская трубка непрерывно смещается параллельно оси трубы. В зависимости от диаметра трубы угол обзора достигает 45° . При движении рентгеновской трубки снимают, как правило, 400 одномерных проекций. Разработанная нами технология реконструкции для такой схемы просвечивания позволяет реконструировать толщины стенок трубы с точностью до 0,5 мм.

Цель данной статьи состоит в разработке компьютерной методики для полного восстановления изображения трубы по рентгеновским проекциям в ограниченном угле обзора при наличии зашумленных данных, позволяющей точное виртуальное измерение толщины стенок трубы и параметров дефектов сплошности. Представлены результаты многолетних исследований в ИПФ и ВАМ по созданию работоспособных технологий для томографической визуализации труб из существенно неполных данных, совместимых с современной рентгеновской аппаратурой. Представлены две базовые технологии томографической визуализации (ТВ), основанные, соответственно, на двух схемах просвечивания. Алгоритмические основы различных технологий для трехмерной томографической визуализации описаны, например, в работах [8–10]. Для иллюстрации потенциальных возможностей данных технологий приведем лишь один из результатов реконструкции специального тестового образца ВАМ, представляющего собой трубу диаметром 112 мм с толщиной стенки 3,6 мм из нержавеющей стали. Оценка абсолютной точности виртуального измерения размеров в произвольном сечении трубы после ТВ позволяет сделать вывод, что она не превышает 300 мкм. Схема сбора данных для данной рекон-

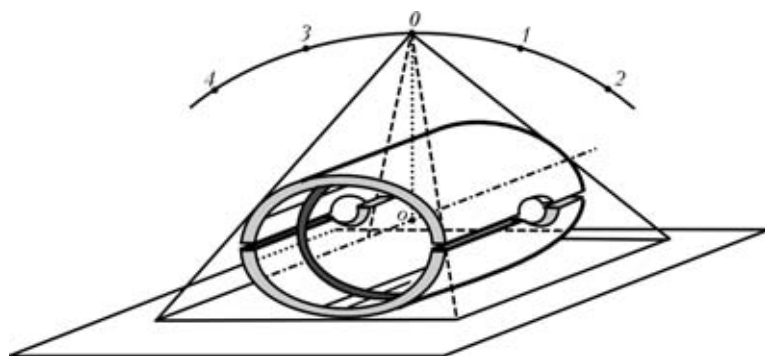


Рис. 2. Схема просвечивания объекта при трехмерной томографической визуализации

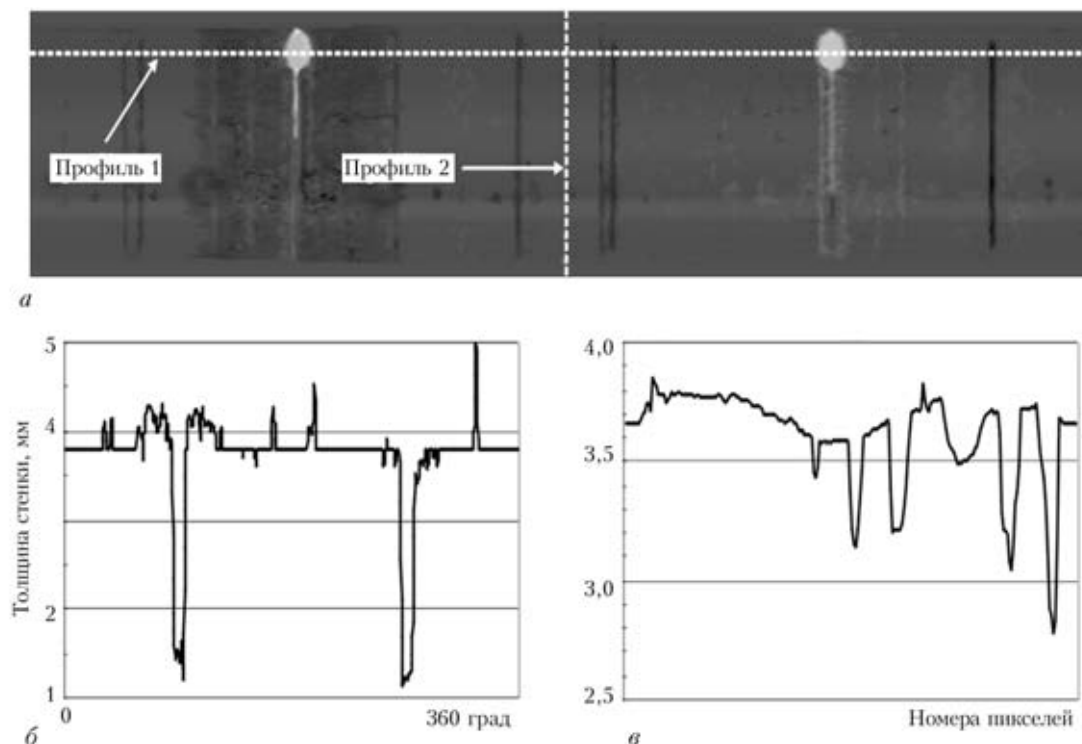


Рис. 3. Развертка реконструированного изображения трубы (а) и два сечения (б) и (в)

струкции представлена на рис. 2. Результат реконструкции в виде развертки трубы изнутри представлен на рис. 3.

Планарная томография сварных швов трубопроводов. Синтез изображений. На рис. 4 показана схема просвечивания продольного сечения трубы на установке механизированной радиометрии, разработанной в ВАМ. Коллимированный в продольной плоскости источник излучения перемещается вдоль линии S-line, так что за один проход он производит до 1200 импульсов излучения, регистрируемого линейным детектором D , передающим информацию в компьютер. Образуется так называемая плоская синограмма, каждая строка которой является результатом одноимпульсного просвечивания. Синограмма является источником первичных данных для реконструкции. После ее предобработки в виде белой и черной коррекции данные поступают на вход алгоритма реконструкции. Дальнейшая проблема состоит в том, что из-за острой нехватки данных вследствие малого угла обзора (всего 35...45° вместо требуемых 180°) ТВ методом фильтрованных обратных проекций (ФОП) позволяет получить лишь расплывчатое изображение трубы с большим количеством артефактов (рис. 5, слева). Видно, что даже стенки трубы исчезают на изображении, в то время, как к контрастным дефектам (трещинам, непроварам и др.) метод ФОП весьма чувствителен.

Разработанная нами технология реконструкции с использованием концепции МСТ позволяет получать в целом качественное изображение. Однако, в связи с использованием сглаживающей априорной информации разрешение может оказаться недостаточным для выявления особо мелких дефектов. Новая технология синтеза обоих методов

позволяет получить высококонтрастное изображение всего объекта (рис. 5, справа) и виртуально провести все линейные измерения на объекте с погрешностью не более 500 мкм. Опишем далее основные математические принципы, положенные в основу обоих подходов. Хотя мы рассматриваем далее алгоритм для планарной томографии, сама методология практически без изменений переносится и на трехмерный случай.

Математический алгоритм планарной томографии. Основные определения. Рассматривается нелинейное операторное уравнение

$$A(\sum_k R_k(M)) = F^{\rightarrow} \quad (1)$$

Здесь $F^{\rightarrow}$ — совокупность измеренных данных для всех проекций. Для N проекций

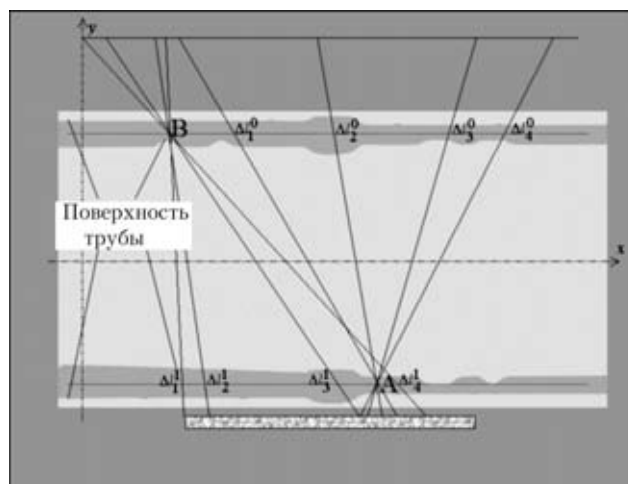


Рис. 4. Схема просвечивания для планарной томографии

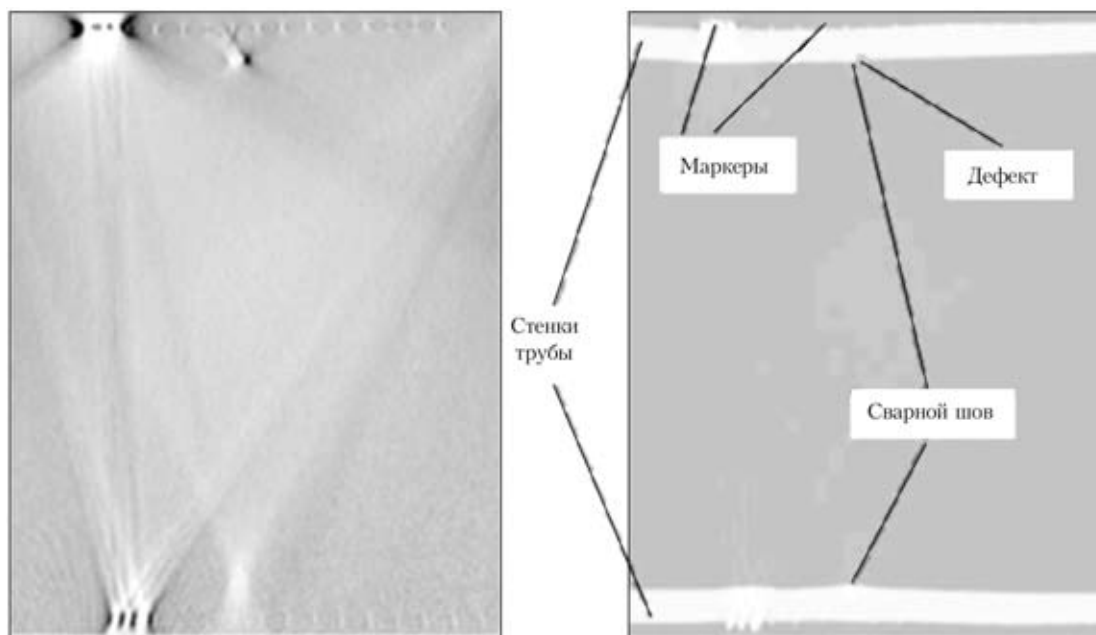


Рис. 5. Изображение трубы, полученное ФОП (слева) и синтезированное ФОП+МСТ (справа)

$\vec{F} = \{f_n^m\}$, $n = 1, \bar{N}$, где функция $f_n^m(p)$ — измеренные данные на n -й проекции; $\{p_j^n: j = 1, \bar{J}_n\}$ — позиции пикселей n -й проекции; ϑ_n — угол проецирования для n -й проекции; $J = \sum_n J_n$ — суммарное число пикселей на всех проекциях. Векторы $\vec{R}_k(M)$ — радиус-векторы текущих точек деформируемых поверхностей $M^{(k)}(x, y, z)$, $\{M_i^{(k)}: i = 1, \bar{I}\}$ — позиции узлов решеток деформируемых поверхностей. Оператор A связывает деформируемые поверхности $S^{(k)}$, определяемые как годографы концов векторов $\vec{R}_k(M)$ и проекции объекта, т. е.

$$A(\sum_k \vec{R}_k(M)) = \{A(\vec{R}_k(M))\}_n, \quad n = 1, \bar{N}.$$

Здесь $(A(\sum_k \vec{R}_k(M)))_n = f_n^c(p)$ — расчетные данные n -й проекции. Используется *линейная геометрия* — рентгеновская трубка перемещается линейно вдоль контролируемой трубы от -100 до 100 мм относительно центра фильма. Просвечивание осуществляется коллимированным веерным пучком. Для *линейной геометрии* используются 400 проекций, соответствующих последовательным положениям источника через $0,5$ мм. Кроме того, мы рассматриваем двумерный объект контроля, описываемый четырьмя оболочками. Каждая из них задается с помощью одномерной линейной сетки и может быть представлена в виде совокупности линейных элементов. Линейный элемент представляет собой отрезок. Для отрезков с первого по предпоследний включительно левая точка принадлежит отрезку, а правая — нет. Последний отрезок, наоборот, включает в себя правый конец

и не включает левого. При таком разбиении границы любого из отрезков не имеют общих точек с границами соседних отрезков.

Расчет прямого оператора. Осуществляется последовательный перебор всех элементов четырех оболочек и для каждой из них: а) находится проекция отрезка S_n на текущую линию детекторов; б) устанавливаются границы отрезка σ_n^p ; в) определяются все пиксели $p_j^n: j = 1, \bar{J}_n$, центры которых лежат внутри отрезка σ_n^p или на его границах; г) рассчитываются точки пересечения лучей, проходящих через центры внутренних и граничных пикселей отрезка σ_n^p с данной поверхностью объекта.

Вычисление точек пересечения с поверхностью сводится к пересечению соответствующих лучей с прямой, определяемой элементом S_n . После определения всех точек пересечения, лежащих на конкретном луче, осуществляется их сортировка по возрастанию параметра прямой, на которой лежит луч. Число точек пересечения для каждого луча всегда будет четным. Вычисляя расстояния между соответствующими парами точек и суммируя их, определим лучевую сумму $f_n^c(p)$ для пикселя $p_j^n: j = 1, \bar{J}_n$, определяющего данный луч.

Таким образом, после обхода всех проекций и расчета прямого оператора

$$A(\sum_k \vec{R}_k(M))_n = f_n^c(p), \quad n = 1, \bar{N},$$

мы определим все расчетные лучевые суммы. Функционал

$$\delta_n(\sum_k \vec{R}_k(M)) = \sum_{p_j^n} |f_n^c(p) - f_n^m(p)| / \sum_{p_j^n} f_n^m(p) \quad (2)$$



измеряет суммарное отклонение поверхностей $S^{(k)}$, заданными дискретными решетками узлов

$M_i^{(k)}$, $i = \overline{1, I}$, от реальных поверхностей, в направлении n -й проекции. Среднее значение отклонения

$$\delta_{\text{mid}}(\sum_k \mathcal{R}_k(M)) = \sum_n \delta_n(\sum_k \mathcal{R}_k(M))/N. \quad (3)$$

Принцип деформации поверхностей объекта.

Для реконструкции внутренней поверхности объекта используется итерационная процедура, обеспечивающая последовательную минимизацию функционала невязки (3). Эта процедура проводится следующим образом: осуществляется последовательный перебор всех узловых точек деформируемых поверхностей $M_i^{(k)}$, $i = \overline{1, I}$. Через каждую узловую точку $M_i^{(k)}$ проводим N лучей, которые пересекут соответствующие линии детекторов в пикселях p_j^n , $i = \overline{1, I}$. Для этих пикселей вычисляем разности между измеренными и вычисленными значениями лучевых сумм $\Delta f_n(p) = f_n^e(p) - f_n^m(p)$. Потом находим среднюю разность

$$\sum(M_i^{(k)}) = \sum_n \Delta f_n(p)/N. \quad (4)$$

Величина смещения узла $M_i^{(k)}$ будет

$$h(M_i^{(k)}) = \lambda^{(0)} * \sum(M_i^{(k)}), \quad (5)$$

где $\lambda^{(0)}$ — величина параметра релаксации для первой итерации. Смещение проводится вдоль прямой, проведенной из данного узла $M_i^{(k)}$ параллельно оси ординат. Смещение поверхности осуществляется для всех узловых точек $M_i^{(k)}$, $i = \overline{1, I}$, одновременно. После смещения всех узловых точек $M_i^{(k)}$ получим новую дискретную решетку $M_i^{(k)}$, $i = \overline{1, I}$. Итерационный процесс останавливается, если для трех последовательных итераций не удается получить лучшее приближение. Каждая из оболочек деформируется независимо от остальных.

Выводы

Разработанные методы реконструкции 2- и 3-мерных изображений объектов по ограниченному числу рентгеноскопических проекций обеспечивают хорошее качество реконструкции и позволяют с достаточной для практических целей точностью оценивать толщины стенок труб. В целом, разработанные компьютерные технологии в сочетании с современными радиоскопическими системами, позволяют осуществить высокоточную томографическую визуализацию технологических трубопроводов, которая может быть положена в основу прогнозирования ресурса последних.

1. *Трехмерная томографическая визуализация труб в процессе эксплуатации* // В. Л. Венгринович, С. А. Золотарев, Ю. Б. Денкевич, Г.-Р. Тиллак // Матер. 4-й Национальной науч.-техн. конференции «Неразрушающий контроль и техническая диагностика», Киев, 2003. — С. 46–50.
2. *Mechanised Weld Inspection by Tomographic Computer Aided Radiometry (TomoCAR)* // B. Redmer, J. Robbel, V. Ewert, V. Vengrinovich // Proceedings of 8-th European conf. for non Destructive Testing. AIPnD, Barcelona, Nuclear, 2002. — P. 121–129.
3. *Schmidt T. R. History of the Remote Field Eddy-Current Inspection Technique* // Materials Evaluation. — 1989. — 47, № 1. — P. 14–22.
4. *Alleyn D., P. Cawley. The Long Range Detection of Corrosion in Pipes Using Lamb Waves* // Review of Progress in QNDE, 14B, Ed., D. O. Thompson and D. E. Chimenti, New York, NY, Plenum Press, 1995. — P. 2073–2080.
5. *Krzywosw K. Flaw Detection and Characterization in Heat Exchanger Tubing* // EPRI report № GC 111672, December 1998.
6. *Anmol S. Birring. election of NDT Techniques for Heat Exchanger Tubing* // Materials Evaluation. — 2001. — 59, № 3. — P. 382–391.
7. *Fisher J. L. Remote Field Eddy-Current Inspection* // ASM Handbook. — 1992. — 17. — P. 195–201.
8. *New technique for 2D an 3D x-ray image restoration of pipes in service given a limited access for observation* // V. Vengrinovich, S. Zolotarev, A. Kuntsevich, G.-R. Tillack // Review of Progress in QNDE, ed. by D. O. Thompson and D. E. Chimenti, 20A, American Institute of Physics, Melville-N.Y., 2001. — P. 756–763.
9. *Vengrinovich V., Denkevich Yu., Tillack G.-R. Reconstruction of Three-Dimensional Binary Structures from an Extremely Limited Number of Cone-Beam x-ray Projections* // Choise of Prior. Journal of Phys., D: Applied Physics. — 1999. — 32. — P. 2505–2514.
10. *Vengrinovich V., Denkevich Yu., Tillack G.-R. Bayesian 3D x-ray reconstruction from incomplete noisy data* // Maximum Entropy and Bayesian Methods, ed. by W. von der Linden et. al., Kluwer Academic Publishers, 1999. — P. 73–83.

Ин-т прикладной физики НАН Белоруссии, Минск
Федеральн. ин-т материаловедения и испытаний, Берлин

Поступила в редакцию
26.02.2004

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ ТОЛЩИНЫ СТЕНОК ТРУБ В ПОТОКЕ ПРОИЗВОДСТВА

В. В. ГАРЬКАВЫЙ, Ю. А. КАТАСОНОВ

Рассмотрен вопрос повышения точности измерения толщины стенок бесшовных трубы и скорости их осевого перемещения при контроле толщины стенки вдоль четырех образующих.

The paper deals with the issue of increasing the accuracy of measurement of wall thickness in seamless pipes, speed of their axial displacement at wall thickness control along four generatrices.

Проблема повышения точности и производительности измерения толщины металлических изделий остается актуальной при проведении как ручного, так и автоматического ультразвукового контроля (УЗК) [1, 2].

Среди множества факторов, влияющих на точность измерения толщины стенок выделяют [1, 2]: отклонение геометрии контролируемого слоя от параллельности за счет искажения поверхностей; неоднородность и непостоянство акустических свойств контролируемых изделий; непостоянство акустического контакта между преобразователями и контролируемыми изделиями; коррозионные повреждения поверхностей; искажения результатов контроля толщины изделий при наличии в металле расслоений; невозможность проведения толщинометрии при высокой температуре.

Технология производства труб пока не позволяет высокопроизводительными методами обработки давлением производить трубы с постоянной толщиной стенок труб по периметру трубы и по ее длине.

УЗК толщины стенок бесшовных цельнокатаных, прессованных и тянутых труб является одной из важнейших операций производства труб и не лишен тех же проблем.

Кроме рассмотренных в работах [1, 2], существует проблема повышения производительности толщинометрии в процессе производства при соблюдении приемлемых погрешностей.

Приемлемые измерения точности $\pm 0,1$ мм для ручного контроля достигаются с помощью известных толщиномеров УТ-56Б, УТ-93П, УТ-83Б [3], ТУЗ-1 [4].

Описанные в работе [5] установки автоматического УЗК труб позволяют для пьезопреобразователей с щелевой системой акустического контакта обеспечить относительную скорость перемещения преобразователей и изделий до 2 м/с. Практически это обеспечивает толщинометрию вращающихся труб при скорости их осевого перемещения до 2 м/мин.

Зарубежные установки с такой же системой акустического контакта позволяют обеспечить скорость осевого перемещения труб до 0,5 м/с [6, 7].

Акустический контакт пьезопреобразователей через слой воды значительной толщины (водяную ванну) позволяет поднять скорость взаимного перемещения изделия и преобразователя до 7 м/с [8].

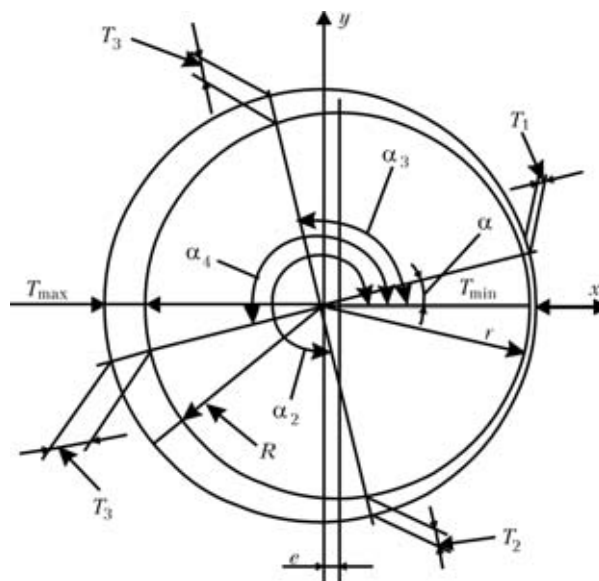
Еще в семидесятых годах НИИИИ и ЦЛАН трубного завода им. В. И. Ленина [9] проведены испытания толщиномеров УТ5-15, в котором применен ЭМА-метод возбуждения и приема УЗ колебаний.

Толщиномер УТ5-15 предназначался для контроля толщины стенок толщиной от 3 до 15 мм труб диаметром от 30 до 140 мм по четырем дорожкам на скорости до 3 м/с. Практические результаты испытаний толщиномеров УТ5-15 и причины, по которым указанный толщиномер не введен в эксплуатацию, не опубликованы.

Основными преимуществами ЭМА-метода являются стабильные условия возбуждения и приема УЗ колебаний и существенно меньшее влияние состояния поверхности на результаты контроля.

ЭМА-метод возбуждения и приема УЗ колебаний реализован в ЭМА толщиномере ФЭРТА ТТ-1 УТ-04, введенном в эксплуатацию в трубопроводном цехе ЗАО «НИКО ТЬЮБ».

Толщиномер аттестован Днепропетровским государственным центром стандартизации, метро-



Схематическое изображение сечения трубы



логии и сертификации и предназначен для толщинометрии стенок труб диаметром от 42 до 114,3 мм со стенками толщиной от 3,5 до 8 мм по четырем дорожкам вдоль образующих трубы по поверхности «после прокатки», свободной от окалины, при температуре от -50 до $+50$ °С со скоростью осевого перемещения до 1 м/с.

Конструкция ЭМА-преобразователя, использованного в толщиномере, позволяет контролировать трубы, температура которых достигает 200 °С.

Длина участков стенки трубы с толщинами, выходящими за пределы установленных допусков, устанавливается от 10 до 99 мм. Частота следования зондирующих импульсов составляет 300 Гц, а частота заполнения не превышает 3,5 МГц.

Фактическая аттестованная погрешность измерения толщины стенок труб ЭМА толщиномером ФЭРТА ТТ-1 УТ-04 составляет 0,07 мм. Длина неконтролируемых концов определена размерами ЭМА преобразователя и составляет около 20 мм.

Эксплуатация толщиномера показала, что практически все трубы производятся со стенками, толщина которых достигает верхнего поля допуска. Учитывая, что поле допуска составляет 25 % от толщины стенки, можно с уверенностью говорить о таком же уровне перерасхода металла на производство труб.

Пожалуй единственным и самым дешевым путем снижения перерасхода металла при производстве бесшовных труб является повышение точности регулирования межклетьевого натяжения труб в процессе их обработки на редуционных станах. Очевидно, что для обеспечения такого регулирования необходима оперативная информация о наименьшей толщине стенок подката трубы на входе и на выходе из редуционного стана.

Скорость УЗК толщины стенки трубы на редуционном стане должна совпадать со скоростью редуцирования трубы и очевидно может быть обеспечена только за счет применения ЭМА-метода. Очевидно также, что для обеспечения контроля толщины стенок труб на редуционном стане необходимо, чтобы ЭМА-преобразователи работали при температуре редуцирования от 800 до 950 °С.

В отличие от автоматических толщиномеров, проводящих контроль толщины стенок вращающихся труб [6–8], толщиномеры, контролирующие толщины стенок труб вдоль образующих, хотя и обеспечивают существенно большую производительность контроля, но не гарантируют выявление стенок труб, толщина которых выходит за пределы установленных допусков.

В настоящей работе решен вопрос определения минимальной и максимальной толщин стенки трубы в контролируемом по четырем дорожкам сечении трубы.

Сечение тела бесшовной трубы в момент ее выхода из очага деформации при изготовлении (рисунок) описывается двумя окружностями со смещенными центрами:

$$R^2 = X^2 + Y^2 \quad (1)$$

и внутренней

$$r^2 = (x - e)^2 + y^2, \quad (2)$$

где e — эксцентриситет окружностей R и r .

Определение минимальной и максимальной толщин стенки трубы сводится к вычислению

$$T_{\min} = T_{\text{ср}} - e, \quad (3)$$

$$T_{\max} = T_{\text{ср}} + e, \quad (4)$$

где $T_{\text{ср}} = R - r$ — средняя толщина стенки трубы.

Практически в процессе измерения толщины стенки по четырем дорожкам (как правило соседние дорожки смещены на 90°) получаем совокупность четырех результатов измерения толщины стенки трубы:

$$T_1 < T_2 < T_3 < T_4. \quad (5)$$

При контроле толщины стенки трубы по четырем дорожкам

$$T_{\text{ср}} = (T_1 + T_2 + T_3 + T_4)/4. \quad (6)$$

Существует вероятность того, что

$$T_1 = T_2 = T_3 = T_4. \quad (7)$$

В этом случае толщина стенки трубы по всему периметру одинакова. Существует также вероятность того, что

$$T_2 = T_3. \quad (8)$$

Тогда очевидно, что $T_1 = T_{\min}$, $T_4 = T_{\max}$.

Только в этих случаях можно гарантировать с аттестованной погрешностью измерения отсутствие брака по толщине стенки трубы.

Для текущего угла α положения преобразователя относительно оси x , проходящей через центр внешней окружности сечения трубы и точку на той же окружности, под которой толщина стенки минимальна, координаты точки пересечения луча, исходящего из центра внешней окружности радиуса R сечения трубы к акустической оси УЗП, определяются выражениями:

$$X = R \cos \alpha, \quad (9)$$

$$Y = R \sin \alpha. \quad (10)$$

Координаты точки пересечения луча, исходящего из центра внешней окружности сечения трубы, с внутренней окружностью радиуса r можно определить из выражений

$$x = X - T \cos \alpha, \quad (11)$$

$$y = Y - T \sin \alpha. \quad (12)$$

Здесь T — толщина стенки по линии луча, пересекающего стенку (в месте измерения толщины).

Углы положения сечений, в которых проводятся измерения толщины стенки, выражаются через угол α положения первого преобразователя относительно оси x : для $T_1 - \alpha < 45^\circ$; для $T_3 - \alpha_3 = 90^\circ + \alpha$; для $T_4 - \alpha_4 = 180^\circ + \alpha$; для $T_2 - \alpha_2 = 270^\circ + \alpha$.



С учетом выражений (9)–(12) координаты точек пересечения лучей, проходящих через дорожки контроля, с окружностями R и r будут иметь вид:

$$\begin{aligned} X_1 &= R \cos \alpha, \quad x_1 = X_1 - T_1 \cos \alpha, \\ Y &= R \sin \alpha, \quad y_1 = Y_1 - T_1 \sin \alpha, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} X_3 &= R \cos(\alpha + 90^\circ), \quad x_3 = X_3 - T_3 \cos(\alpha + 90^\circ), \\ Y_3 &= R \sin(\alpha + 90^\circ), \quad y_3 = Y_3 - T_3 \sin(\alpha + 90^\circ), \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} X_4 &= R \cos(\alpha + 180^\circ), \quad x_4 = X_4 - T_4 \cos(\alpha + 180^\circ), \\ Y_4 &= R \sin(\alpha + 180^\circ), \quad y_4 = Y_4 - T_4 \sin(\alpha + 180^\circ), \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} X_2 &= R \cos(\alpha + 270^\circ), \quad x_2 = X_2 - T_2 \cos(\alpha + 270^\circ), \\ Y_2 &= R \sin(\alpha + 270^\circ), \quad y_2 = Y_2 - T_2 \sin(\alpha + 270^\circ). \end{aligned} \quad (16)$$

После подстановки (13)–(16) в (2) имеем:

$$(R - T_{cp})^2 = [(R - T_1) \cos \alpha - e]^2 + [(R - T_1) \sin \alpha]^2, \quad (17)$$

$$\begin{aligned} (R - T_{cp})^2 &= [(R - T_3) \cos(\alpha + 90^\circ) - e]^2 + \\ &+ [(R - T_3) \sin(\alpha + 90^\circ)]^2, \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} (R - T_{cp})^2 &= [(R - T_4) \cos(\alpha + 180^\circ) - e]^2 + \\ &+ [(R - T_4) \sin(\alpha + 180^\circ)]^2, \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} (R - T_{cp})^2 &= [(R - T_2) \cos(\alpha + 270^\circ) - e]^2 + \\ &+ [(R - T_2) \sin(\alpha + 270^\circ)]^2. \end{aligned} \quad (20)$$

Для вычисления e и α необходимо знать R и решить систему уравнений (17)–(20).

Для измерения диаметра внешней окружности сечения трубы достаточно определить время прохождения поверхностной волны по периметру трубы, который остается неизменным независимо от деформации сечения.

Очевидно, что уравнения достаточно громоздкие и требуют большой вычислительной работы. Зная e , несложно вычислить $T_{\min}$ и $T_{\max}$.

Очевидно, что применение ЭМА толщиномеров, проводящих измерение толщины стенки трубы по четырем образующим на скоростях редуцирования, и определение по результатам измерений с помощью разработанного алгоритма минимальной толщины стенки позволяет оперативно автоматически управлять процессом формирования толщин стенки трубы, экономить металл у производителя труб и одновременно гарантировать потребителю поставку труб, толщина стенок которых не меньше минимально допустимой.

1. Гребенник В. С. Ультразвуковые методы измерения толщины // Дефектоскопия. — 1967. — № 5. — С. 1–23.
2. Козин А. Н. Измерение толщины ультразвуковыми толщиномерами с А-разверткой // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2003. — № 2. — С. 41–44.
3. Королев М. В., Коновалов А. А., Старилов Б. П. Ультразвуковой автокалибрующий толщиномер УТ-85Б // Дефектоскопия. — 1988. — № 4. — С. 59–65.
4. ТУЗ-1 — прекрасный ручной ультразвуковой толщиномер со сканированием / В. А. Чуприн, Г. Г. Луценко, Л. А. Шиманский и др. // Неразруш. контроль. — 1999. — № 3. — С. 3–5.
5. Шалашов Г. И., Диозу И. Г. Автоматизированная ультразвуковая дефектоскопия толстостенных труб большого диаметра // Дефектоскопия. — 1968. — № 6. — С. 19–23.
6. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Т. 2 / Справ. под ред. В. В. Клюева. — М.: Машиностроение, 1979. — 238 с.
7. Неразрушающий контроль и диагностика: Справ. / В. В. Клюев, Ф. Р. Соснин, В. Н. Филипов и др. // Под ред. В. В. Клюева. — М.: Машиностроение, 1995. — 488 с.
8. Мацуяма Х. Современная автоматизированная ультразвуковая система для стальной продукции в Японии. — Токио, Мицубиси электрик, 1992.
9. Шкарлет Ю. М. Бесконтактные методы ультразвукового контроля. — М.: Машиностроение, 1974. — 57 с.

Науч.-произв. фирма «ФЭРТА»,
Харьков

Поступила в редакцию
20.02.2004

Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики 12-я Международная конференция и выставка 20–24 сентября 2004 г. (Ялта)

Тематика конференции:

- Общие вопросы неразрушающего контроля (НК) и технической диагностики (ТД).
- Теоретические вопросы взаимодействия физических полей с веществом контролируемых объектов.
- Средства, системы, методики НК и ТД.
- Эксплуатационные характеристики и определение остаточного ресурса изделий.
- Методологическое обеспечение средств НК.
- Вопросы подготовки и аттестации специалистов, аккредитация подразделений НК и ТД.
- Исполнение Законов Украины «О стандартизации», «О подтверждении соответствия», «Об аккредитации органов по оценке соответствия» — путь повышения конкурентоспособности украинской продукции.
- Разработка стандартов в области НК и ТД.
- Заседание правления УО НКТД.

По всем вопросам, касающимся проведения конференции и выставки, обращаться к генеральному директору Украинского информационного центра «НАУКА. ТЕХНИКА. ТЕХНОЛОГИЯ» Главацкой Зое Юрьевне.

Тел./факс +380 44 573-3040 (с 8.00 до 14.00)
E-mail: office@conference.kiev.ua
Почтовый адрес: 02094 Киев, а/я 41. УИЦ «НТТ»

ОСОБЕННОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ В РАДИАЛЬНОМ НАПРАВЛЕНИИ ОСЕЙ КОЛЕСНЫХ ПАР ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Г. Г. БАСОВ, В. Л. МАРКОВ, А. Н. КИРЕЕВ, С. А. ВОЛКОВА

Приведены результаты экспериментальных исследований влияния радиуса кривизны цилиндрической поверхности чистовых осей колесных пар подвижного состава железных дорог на амплитуду эхосигнала от искусственных отражателей при ультразвуковом контроле эхоимпульсным методом контактным способом с цилиндрической поверхности оси продольными волнами в радиальном направлении на отсутствие внутренних недопустимых несплошностей. Результаты работы имеют практическое значение и использовались при внедрении в ОАО Холдинговая компания «Лугансктепловоз» УЗ контроля осей в радиальном направлении.

The paper gives the results of experimental studies of the influence of curvature radius of a cylindrical surface of finish axles in wheel pairs of railway rolling stock on the amplitude of echo signals from artificial reflectors in ultrasonic testing by echo-pulse method using contact technique from the cylindrical surface of the axle by longitudinal waves in the radial direction for absence of inadmissible inner discontinuities. Results of the studies are of practical importance and were used in introduction of UT control of the axles in the radial direction at OJSC "Luganskteplovoz" Holding Company.

Для обеспечения безопасности движения на железных дорогах оси колесных пар подвижного состава должны подвергаться ультразвуковому контролю (УЗ) на «прозвучиваемость» и на отсутствие внутренних недопустимых несплошностей [1–3].

Одним из обязательных вариантов УЗ осей является контроль эхоимпульсным методом контактным способом с цилиндрической поверхности чистовой оси продольными волнами в радиальном направлении на наличие внутренних недопустимых несплошностей.

Настройка чувствительности УЗ дефектоскопа является наиболее ответственной методической операцией в технологическом процессе УЗ контроля [4]. При УЗ контроле в осевом направлении настройку чувствительности дефектоскопа проводят по искусственным отражателям в виде плоского дна цилиндрического отверстия, расположенного перпендикулярно оси цилиндра. Такой тип искусственного отражателя применяется в США и во многих странах Европы [5].

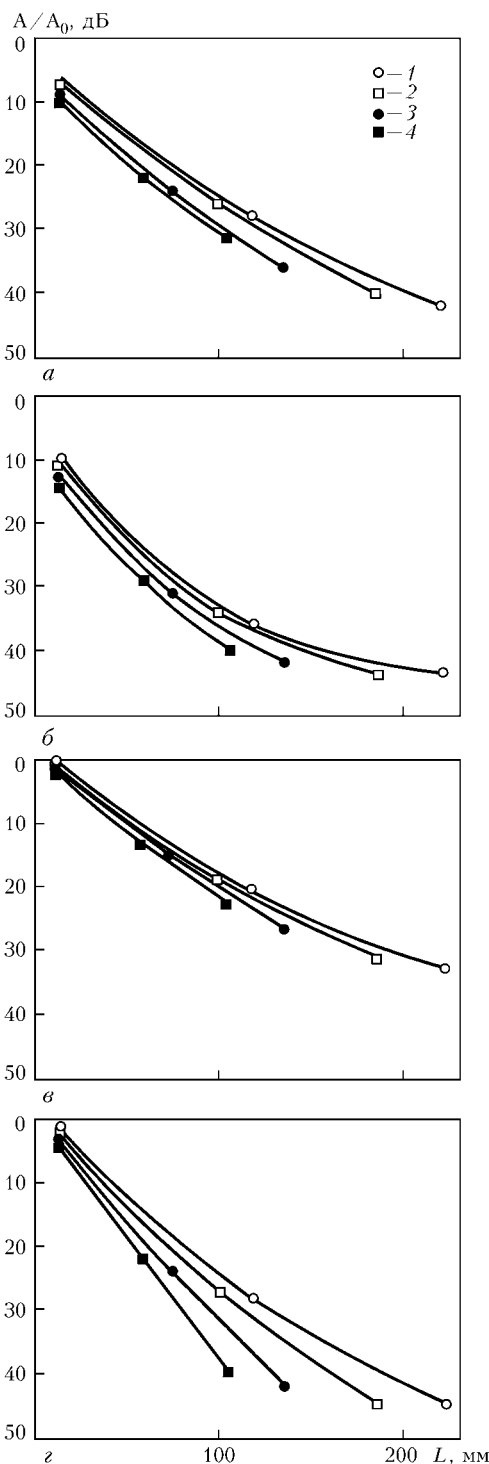
При УЗ контроле осей в радиальном направлении кривизна поверхности изделия влияет на акустический тракт, и соответственно, на амплитуду эхосигнала. Контроль контактным способом преобразователем с плоской контактной поверхностью изделия с выпуклой цилиндрической поверхностью исследован в работе [6]. Толщина контактного слоя будет меньше для центральной и больше для краевых точек преобразователя. Таким образом, между контактной поверхностью преобразователя и цилиндрической поверхностью изделия образуется расфокусирующая линза для ультразвука. Кроме того, большая толщина контактного слоя у краевых точек уменьшит эффективность их работы. В результате уменьшится действующая площадь преобразователя, а следовательно, еще больше увеличится расхождение УЗ

лучей. Согласно экспериментальным оценкам работы [7], формулами акустического тракта при контроле контактным способом на частотах 1,8...2,5 МГц можно пользоваться, если радиус кривизны поверхности больше 500 мм. Радиус кривизны цилиндрической поверхности осей изменяется в пределах от 60 до 118 мм.

В данной работе проведено исследование влияния радиуса кривизны цилиндрической поверхности осей на амплитуду эхосигнала от искусственных отражателей, расположенных на разной глубине, для корректировки чувствительности дефектоскопа при УЗ контроле осей эхоимпульсным методом контактным способом с цилиндрической поверхности продольными волнами в радиальном направлении на наличие внутренних недопустимых несплошностей.

Для исследования использовались образцы, изготовленные из частей оси с радиусами кривизны R (60, 75, 100 и 118 мм). Искусственные отражатели в образцах выполнены в виде цилиндрических отверстий с плоским дном, расположенным перпендикулярно оси цилиндра диаметром 3 и 5 мм, залегающими на минимальной, средней и близко к максимальной глубине зоны контроля. Шероховатость образцов соответствует шероховатости контролируемых осей.

Экспериментально исследовали влияние радиуса кривизны цилиндрической поверхности на амплитуду эхосигнала от искусственных отражателей диаметром 3 и 5 мм при УЗ контроле эхоимпульсным методом контактным способом с цилиндрической поверхности продольными волнами в радиальном направлении. Измерения проводили прямым преобразователем с плоской контактной поверхностью: на частоте 2,5 МГц — диаметр пьезопластины 12 мм, диаметр контактной поверхности 17 мм; на частоте 5 МГц — диаметр



Зависимости амплитуды эхосигналов от радиусов кривизны цилиндрической поверхности образцов: 1 — $R = 118$ мм; 2 — 100; 3 — 75; 4 — 60 (а, б — на частоте 2,5 МГц, диаметр отражателя 5 и 3 мм соответственно; в, г — на частоте 5 МГц, диаметр отражателя 5 и 3 мм соответственно)

пьезопластины 8 мм, диаметр контактной поверхности 10 мм. В качестве контактной жидкости использовали масло индустриальное И-20. Влияние стекания масла исключалось тем, что измерения проводили после нанесения масла на поверхность образца. В качестве опорного сигнала был взят донный сигнал на образце СО-2 [8]. Результаты эксперимента приведены на рисунке, где A_0 — амплитуда опорного сигнала; A — амплитуда сигнала от искусственного отражателя; L — глубина расположения искусственного отражателя.

Из анализа полученных результатов следует, что величина амплитуды эхосигнала от искусственного отражателя зависит от радиуса кривизны по всей контролируемой глубине. Эта зависимость больше при диаметре отражателя 3 мм, и тем больше, чем глубже расположен отражатель. Из этого следует, что для достоверного УЗ контроля эхоимпульсным методом контактным способом с цилиндрической поверхности чистовых осей продольными волнами в радиальном направлении на наличие внутренних недопустимых несплошностей настройку чувствительности дефектоскопа следует проводить на стандартных образцах предприятия с радиусом кривизны, соответствующем радиусу кривизны контролируемой цилиндрической поверхности оси, или можно использовать образец с другим радиусом кривизны цилиндрической поверхности с корректировкой чувствительности на величину, вытекающую из зависимостей, показанных на рисунке.

Результаты этих исследований использовались в Холдинговой компании «Лугансктепловоз» при внедрении УЗ контроля осей колесных пар подвижного состава железных дорог в радиальном направлении.

1. ГОСТ 11018-2000. Колесные пары. Общие технические требования.
2. ГОСТ 30237-96. Оси чистовые для подвижного состава железных дорог колеи 1520 мм. Технические требования.
3. РД 32.144-2000. Контроль неразрушающий приемочный. Колеса цельнокатанные, бандажи и оси колесных пар подвижного состава. Технические требования.
4. Алешин Н. П., Белый В. Е. Методы акустического контроля металлов. — М.: Машиностроение, 1989. — 456 с.
5. Ермолов И. Н., Алешин Н. П., Потанов А. И. Неразрушающий контроль. — Кн. 2. Акустические методы контроля. — М.: Высшая школа, 1991. — 283 с.
6. Голубев А. С., Павлов С. К. Расчет акустического тракта эхо-дефектоскопа при контроле изделий с криволинейной поверхностью контактным способом // Изв. Ленинград. электротехнич. ин-та. — 1970. — 89. — С. 122-124.
7. Розина М. В. Некоторые особенности ультразвукового контроля тел вращения // Дефектоскопия. — 1966. — № 4. — С. 16-21.
8. ГОСТ 14782. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые.



КОНФЕРЕНЦИЯ-ВЫСТАВКА «НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ — 2004»

С 18 по 21 мая 2004 г. в г. Киеве в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины проходила 7-я Научно-техническая конференция-выставка «Неразрушающий контроль — 2004».

Конференция была организована Ассоциацией «ОКО» совместно с Украинским обществом неразрушающего контроля и технической диагностики, Институтом электросварки им. Е. О. Патона НАНУ, Департаментом железнодорожного транспорта, Национальной энергетической компанией «Энергоатом» и рядом других организаций.

В работе конференции приняли участие известные ученые и специалисты в области неразрушающего контроля из Украины, России, Беларуси, Хорватии, Франции, Испании, Великобритании — всего около 400 участников из более чем 200 организаций и предприятий.

Особенно ценным для участников конференции-выставки было присутствие на них метра дефектоскопии доктора технических наук, профессора, главного научного сотрудника НИИ мостов МПС России **Гурвича Анатолия Константиновича**. Бесценный опыт, которым он щедро делился с участниками конференции, и внимание, которое он уделял коллегам, а также его выступления сделали заседания секций более глубокими и содержательными.

На пленарном заседании выступили руководители и ведущие специалисты ряда организаций и предприятий, представивших свои разработки на выставочных стендах, а также руководители секций конференции, рассказывающие о программе предстоящей работы.

Основная работа конференции была продолжена в секциях:

- Неразрушающий контроль в путевом хозяйстве железной дороги;
- Неразрушающий контроль в вагонном хозяйстве железной дороги;
- Неразрушающий контроль в локомотивном хозяйстве железной дороги;
- Неразрушающий контроль в метрополитене;

- Неразрушающий контроль в атомной энергетике;
- Неразрушающий контроль в авиации;
- Неразрушающий контроль в нефтегазовой отрасли;
- Неразрушающий контроль в тепловой энергетике;
- Неразрушающий контроль методами проникающих веществ;

- Метрологическое обеспечение средств неразрушающего контроля.

Как видно из названий секций, большое внимание было уделено неразрушающему контролю на железнодорожном транспорте. Работой трех «железнодорожных» секций руководили специалисты Укрзалізничного *Носач А. Н., Соломаха С. А., Скобленко В. М.*

Большое оживление в работе секции «Путевое хозяйство» было вызвано докладом заместителя директора НТЦ систем неразрушающего контроля ОАО «Радиоавионика», д-ра техн. наук *Маркова А. А.* Увлеченные дискуссии по решению проблем дефектоскопии рельсов затянулись на несколько часов.

ФГУП ВНИИЖТ (г. Москва) на конференции представлял заведующий отделением Управления безопасностью движения и неразрушающего контроля *Косарев Л. Н.* Его выступления на секциях по железнодорожному транспорту вызвали живой интерес у присутствующих.

Интересной была дискуссия на секции «Неразрушающий контроль в атомной энергетике» (руководитель *Корниец В. В.*), где наряду со специалистами Украины выступили гости из Испании (*Х. Санчос*, «Texatom»), Хорватии (*Д. Станич*, «Inetec»), России (*Д. Померанцев*, «Olympus»).

Как всегда заинтересованной и деловой была атмосфера на заседании секций «Неразрушающий контроль в авиации» (руководитель профессор *Белокур И. П.*) и «Неразрушающий контроль в нефтегазовой отрасли» (руководитель *Зинчак Я. М.*), где было представлено около 30 докладов.

Впервые на такой конференции была организована секция «Неразрушающий контроль методами проникающих веществ» (руководитель *Посытайко Ю. Н.*),





посвященная памяти Боровикова А. С., внесшего значительный вклад в становление и развитие этого вида неразрушающего контроля. В этом году ему исполнилось бы 75 лет.

Одновременно с работой конференции проходила выставка приборов, средств и материалов для неразрушающего контроля изделий и сооружений, в работе которой приняли участие около 25 экспонентов из Украины, России и других стран:

OLYMPUS (г. Москва), SOCOMATE INTERNATIONAL (Франция), SONATEST (Великобритания), ЗАО «Виброштит» (г. Киев), ИЭС им. Е.О. Патона (г. Киев), УГПП «Изотоп» (г. Киев), ООО «Интер-Сет» (г. Донецк), ООО «Интерюнис» (г. Моск-

ва), НПФ «Диагностические приборы» (г. Киев), МП «Дисит» (г. Киев), НПЦ «Диагностика и контроль» (г. Николаев), ООО «Кром» (г. Днепропетровск), Корпорация «МАС-ИПР», МПП «Машиностроение» (г. Днепропетровск), МПП «Онико» (г. Киев), НПФ «Промприлад» (г. Киев), завод «Прожектор» (г. Малин), ООО «Сафи» (г. Киев), ЗАО «Синтез НДТ» (г. Санкт-Петербург), НПФ «Специальные научные разработки» (г. Харьков), НПФ «Ультракон-Сервис» (г. Киев), НПФ «Ультракон» (г. Киев), УО НКТД (Украина), УкрНИИНК (г. Киев).

Посетители выставки имели возможность познакомиться с самыми современными разработками как специалистов Украины и России, так и фирм Европы.

Организатор конференции-выставки — Ассоциация «ОКО» — традиционно проводит это мероприятие в мае месяце в период цветения каштанов, когда город наполнен неповторимым весенним очарованием.

Также традиционно на теплоходе им. А. Довженко был устроен дружеский прием для участников конференции-выставки «Неразрушающий контроль — 2004», где специалисты из разных стран смогли почувствовать себя в общей «стране неразрушающего контроля».

*Информационное сообщение подготовили
Ю. Н. Посыпайко, ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ;
Т. М. Луценко, НПФ «Промприлад»*



НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ И ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

III Международная специализированная выставка и конференция

17–19 марта 2004 г.

Москва, Центр Международной Торговли

Организаторы: Выставочные компании ООО «ПРИМЭКСПО» (Россия) и ITE Group Plc (Великобритания), Российское общество по неразрушающему контролю и технической диагностике (РОНКТД).

Официальная поддержка: Министерство промышленности, науки и технологий РФ, Правительство Москвы, Федеральный горный и промышленный надзор России и Государственный комитет РФ по стандартизации и метрологии, а также Международный комитет по неразрушающему контролю (ICNDT) и Европейская Федерация по неразрушающему контролю (EFNDT).

Разделы выставки:

- Акустическая эмиссия
- Ультразвуковой контроль
- Вихревой контроль

- Визуальный и оптический контроль
- Магнитопорошковый контроль
- Электромагнитный контроль
- Инфракрасный и термический контроль
- Динамический контроль твердости
- Вибрационный контроль
- Капиллярный контроль
- Течеискание
- Радиографический контроль
- Электрический контроль
- Радиационный контроль
- Контроль трубопроводов
- Обучение и сертификация персонала
- Аттестация лабораторий

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ СЕГОДНЯ

К настоящему времени НК превращается в самостоятельную отрасль промышленности, решающую задачи обследования и создания аппаратуры, методик контроля, не разрушающих при этом целостности объекта и

не требующих остановки производства. Важность промышленного неразрушающего контроля и технической диагностики в различных отраслях деятельности человека приобретает все большее значение во всем мире,



и особенно возросла в век техногенных катастроф. Сейчас многие промышленные отрасли остро нуждаются в современных приборах и оборудовании для неразрушающего контроля. Развитие направления НК имеет, безусловно, международное значение и первоочеред-

ное для России, учитывая как протяженную сеть трубопроводов, частично выработавших проектный ресурс или находящихся в близком к этому состоянию, так и потребности развитой российской энергетики, тепло- и гидроэлектростанций, АЭС, газовой, химической, металлургической и горной промышленности, авиации, судостроения, автомобилестроения, транспорта, станкостроения, машиностроения, промышленного и гражданского строительства, приборостроения и пр. Безопасная эксплуатация промышленного оборудования и трубопроводных сетей требует наличия качественной исходной информации о состоянии систем и их элементов. Именно эти задачи решают неразрушающий контроль и техническая диагностика.

На выставочной площади 2500 м² были представлены стенды 140 компаний из 10 стран мира, в т. ч. Германии, Великобритании, Италии, Швейцарии, США, Китая, Японии, Украины, Молдовы. За три дня выставки посетило более 9 тыс. специалистов, занятых в различных промышленных отраслях, со всех регионов России, СНГ и из-за рубежа.

Выставочные события

Пресс-конференция: по случаю открытия выставки собрал рекордное количество журналистов общинформационной и специализированной прессы. В пресс-конференции приняли участие: *Клюев В. В.*, генеральный директор ЗАО НИИ Интроскопии ООО Спектр, Президент РОНКТД; *Самокрутов А. А.*, заместитель генерального директора ЗАО НИИ Интроскопии ООО Спектр; *Котельников В. С.*, Госгортехнадзор России, начальник управления по котлонадзору и надзору за подъемными сооружениями; *Мокроусов С. Н.*, начальник управления по надзору в нефтяной и газовой промышленности Госгортехнадзора России; *Бадах М. В.*, директор выставки «Промышленный Неразрушающий Контроль». Была отмечена возрастающая роль неразрушающего контроля для российской промышленности и особенно, в свете последних событий, для зданий и объектов общественного назначения. Роль выставки и научно-практической конференции, как прозвучало, заключается в объединении усилий российских и международных институтов, разрабатывающих технологии и оборудование для НК, в целях дальнейшего развития отрасли и повышения безопасности не только промышленной, но и социальной.

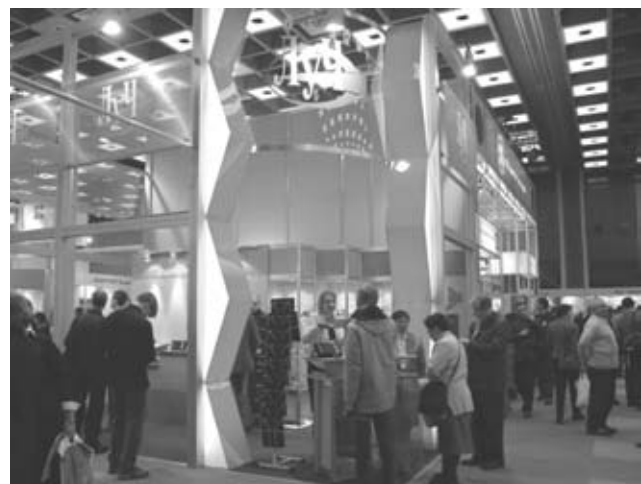
Научно-практическая конференция «Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности» собрала более 500 специалистов со всей России и из-за рубежа. Было заслушано более 200 докладов по проблемам НК. В рамках конференции состоялась встреча глав отделений Европейской Федерации по НК. Предыдущие встречи проходили в Барселоне (2002) и Риме (2000).

Конкурс «Высокий Стиль Экспозиции». Прошел в первый день выставки, 17 марта. Жюри отметило стенды компаний: GE Inspection Technologies, НПЦ Луч, НПГ Алтек. Кроме того, были отмечены компании за индивидуальный дизайн стенда.

Официальная церемония открытия выставки. В церемонии приняли участие: *Клюев В. В.*, генеральный директор ЗАО НИИ Интроскопии ООО Спектр, Президент РОНКТД; *Дуглас Маршалл*, Президент Канад-



кого общества по НК; *Котельников В. С.*, Госгортехнадзор России, начальник управления по котлонадзору и надзору за подъемными сооружениями; *Эдвард Строон*, Генеральный директор ООО ПРИМЭКСПО, Исполнительный директор ITE Group Plc; *Бадах М. В.*, директор выставок «Промышленный Неразрушающий Контроль».





В приветствиях выставке отмечено, что «сегодня неразрушающий контроль качества — производственная необходимость. Уровень развития промышленности передовых стран на современном этапе характеризуется не только объемом производства и ассортиментом выпускаемой продукции, но и показателями ее качества. Контроль качества является самой массовой технологической операцией в производстве. В связи с усложнением и требованием неуклонного повышения надежности новой техники, трудоемкость контрольных операций в промышленности резко увеличивается».

Выставка «ПРОМЫШЛЕННЫЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ» ежегодно представляет новейшее диагностическое оборудование и технологии контроля состояния промышленных и строительных объектов, транспортных магистралей, трубопроводов и пр., — Министр промышленности, науки и технологий Российской Федерации *Фурсенко А. А.* «В любом мегаполисе во всем мире сегодня резко обозначились проблемы безопасной эксплуатации промышленного оборудования транспорта, жилищно-коммунального комп-

лекса. Остро стоит проблема технического обеспечения антитеррористической деятельности. Москва, обладающая разветвленной сетью водо- и газопроводов, промышленных коммуникаций и транспортных магистралей, нуждается в квалифицированной оценке технического состояния ресурсов. Уверен, что выставка поможет в решении целого комплекса обозначенных проблем», — мэр города Москва, Юрий Лужков.

Официальный вечерний прием / церемония вручения наград. Официальный вечерний прием, посвященный открытию выставки, состоялся 17 марта, в гостинице «Международная». На приеме присутствовали более 300 человек — участники выставки, официальные делегации, партнеры ООО «Примэкспо», представители СМИ. Во время вечернего приема прошла церемония вручения наград и дипломов победителям конкурсной программы, проводимой в рамках выставки.

Информационное сообщение подготовлено организаторами конференции-выставки



5-я КОНФЕРЕНЦИЯ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ ЦЕНТРОВ УКРАИНЫ

25–28 мая 2004 г. прошла 5-я Конференция испытательных центров Украины, соорганизаторами которой выступили: Украинская ассоциация качества, Союз испытательных центров Украины, Национальное агентство Украины по аккредитации (НААУ) и ДП «Укрметртестстандарт».

В работе конференции приняли участие более 80 специалистов ведущих предприятий, региональных центров стандартизации, метрологии и сертификации, руководители испытательных, измерительных и контрольно-аналитических лабораторий и центров из 18 областей Украины.

Среди докладчиков: президент УАК **П. Я. Калита**; председатель НААУ **С. А. Казанцев**; ректор ДП УкрНИИЦ Госпотребстандарта Украины **В. М. Новиков**; начальник центра испытаний продукции ДП «Укрметртестстандарт» **В. К. Семенович**; заведующий Центром контроля качества продукции УкрНИИспиртбиоп-

рода **Е. А. Писарев**; представитель ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, докт. техн. наук **В. И. Карманов** и др.

Во время Конференции активно обсуждались вопросы, связанные с аккредитацией лабораторий согласно требованиям ISO/IEC 17025, с разработкой и внедрением систем управления качеством в лабораториях по стандартам ISO/IEC 17025 и ISO 9000 и др.

Значительный интерес вызвала школа-семинар «Аккредитация испытательных лабораторий согласно требованиям ДСТУ ISO/IEC 17025», которую провели В. К. Семенович и З. А. Зарецкий (ДП «ГосавтотрансНИИпроект»). Теоретические знания дополнены практическим опытом центров испытаний техники и пищевых продуктов ДП «Укрметртестстандарт» и лаборатории испытаний и диагностики дорожных транспортных средств ДП «ГосавтотрансНИИпроект» во время посещения этих центров, которые считаются ведущими





в отрасли. Сотрудники этих лабораторий поделились приобретенным опытом.

Презентация корпорации «SALEX» по комплексному обеспечению лабораторий «Современная лаборатория — путь к качеству и успеху», в том числе лекции специалистов из Москвы и Киева по лабораторной ос-

настке и современным методам анализа, вызвали немало вопросов у присутствующих на Конференции.

Спонсорами Конференции выступили корпорация «SALEX» и ДП «Козливский спиртовой завод».

Участники высоко оценили уровень организации мероприятия, содержательные доклады и практическую полезность Конференции.



УКРАИНСКИЕ ДЕФЕКТОСКОПИСТЫ ПРОВЕЛИ КОНФЕРЕНЦИЮ В ТУРЦИИ

Майские праздники всегда в нашем народе ассоциировались с трудом, радостью и открытым взглядом в будущее на встречу весне и солнцу. А почему бы не совместить хорошее рабочее майское настроение с прекрасным отдыхом в теплой и гостеприимной Турции? Почему бы не обсудить серьезные вопросы неразрушающего контроля, накопившиеся за холодную долгую зиму, под пальмами еще нежного в мае турецкого солнца? А потом после продуктивной работы сидеть с бокалом красного вина на берегу Средиземного моря и слушать неповторимые восточные напевы в стиле сказок и тайн «Тысячи и одной ночи Шахерезады»?

Так и сделали участники Второй научно-практической конференции по НК в Турции. Организаторами конференции выступили **Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики, НПФ «Диагностические приборы», НПФ «Ультракон», Украинский информационный центр «НАУКА. ТЕХНИКА. ТЕХНОЛОГИЯ».**

Конференция «Современные аспекты организации неразрушающего контроля качества продукции на промышленном предприятии» прошла с 1 по 8 мая 2004 г. в утопающем в пальмах и цветах клубе пятизвездочной категории Majesty Club Palm Beach на побережье Средиземного моря в районе исторического города Сиде.

Целью конференции являлось *определение наиболее эффективных путей развития служб НК качества на промышленном предприятии в современных условиях.* Разрабатывались подходы к построению служб НК качества, по-новому рассматривались проблемы системы качества, эффективная стратегия ее развития и оптимизация затрат на функционирование и техническое перевооружение подразделений НК.



В конференции приняло участие более 60 специалистов и сопровождающих их лиц из Украины и России (7 человек). Участники конференции представляли практически все отрасли украинской науки и промышленности, связанные с неразрушающим контролем и технической диагностикой:

- крупнейшие украинские предприятия — Одесский припортовый завод, ГАК «Титан», ДП «Укртрансгаз», ОАО «Мотор Сич»;
- институты Национальной академии наук Украины — Институт электросварки им. Е. О. Патона, Институт монокристаллов, Институт физики полупроводников;
- учебные институты — Национальный авиационный университет;
- надзорные и экспертные организации — Николаевский и Донецкий ЭТЦ, ТЮФ НордДизкс, Техдиагаз;
- сервисные и специализированные предприятия — НПП «Машиностроение», АЦНК при ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ, ООО «Алгоритм», Украинский информационный центр «НАУКА. ТЕХНИКА. ТЕХНОЛОГИЯ»;
- разработчиков и производителей средств НК и ТД — ООО «Ультрасоник», НПФ «Ультракон», Центр радиационного приборостроения, Луганский институт специавтоматики;
- поставщиков оборудования и материалов — НПФ «Диагностические приборы», ДП-Тест, Интрон-СЭТ, Арматор, САФИ, ГП «Изотоп».

Российских участников представляли: Ассоциация «Тестрон» — известный производитель рентгеновской техники, ЗАО «Литас» — крупный производитель и поставщик средств НК, Казанское ПО «ТАСМА» — единственный производитель рентгеновской пленки для технических целей, Балаковский институт техники технологии и автоматики — учебный институт.

Как и предполагалось, основу конференции составили руководящие работники — директора, заместители директора по техническим вопросам, начальники различных служб, связанные с НК и ТД, известные ученые. Это позволило создать непринужденную и дружескую атмосферу, которая возникает, когда вместе собираются единомышленники.

В научной программе конференции было представлено более 20 докладов.

Наибольший интерес вызвали доклады *Мозгового А. В.* «Информационно-измерительная технология комплексного акустического контроля крупногабаритных изделий из композитов»; *Е. Лисецкой* «Двухэнер-



гетическая линейка детекторов для неразрушающего контроля»; *П. А. Балакирева* «Проблемы и особенности НК и ТД в авиации и машиностроении»; *А. А. Землянского* «Мониторинг напряженно-деформированного состояния нефтеналивных резервуаров»; *И. Я. Шевченко* «Неразрушающий контроль труб в процессе производства», *И. П. Билокура* «Повышение информативности неразрушающего контроля качества материалов и узлов авиационной техники».

Интересная и плодотворная дискуссия возникла по вопросам комплектования лабораторий, служб и участков НК ультразвуковыми дефектоскопами ручного и автоматизированного контроля, которые были рассмотрены в докладе *Е. Г. Грудской*.

Большое внимание вызвали представленные на конференции результаты исследований и разработок по вихретоковой и ультразвуковой дефектоскопии, рентгенографии, рентгенографии, твердометрии, которые показали перспективы этих методов.

О деятельности компаний представили доклады: ООО «Ультрасоник» (Киев), НПФ «Диагностические приборы» (Киев), НПП «ИНТРОН-СЕТ» (Донецк), НПФ «УЛЬТРАКОН» (Киев), НТА «ТЕСТРОН» (Санкт-Петербург), ЗАО «ЛИТАС» (Казань).

Но не только работа создавала приподнятое настроение. Теплоты добавило море и прогулка на яхте, соп-



ровожаемая таинственностью восточных красавиц, изысканными винами, колоритными блюдами из рыбы.

Пребывание участников конференции было организовано турецким туроператором Yunaуа Tour. Мы благодарим всех сотрудников компании и персонально директора господина Айран Сарач, который известен своей деятельностью в качестве почетного консула Украины в г. Анталия.

*Информационное сообщение
организаторов конференции*



ВНИМАНИЮ СПЕЦИАЛИСТОВ!

Отдел № 4 Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины разрабатывает технологию и средства неразрушающего контроля (НК) с использованием ультразвуковых, радиационных и других методов. Специалисты отдела проводят инспекцию промышленных объектов: трубопроводов, резервуаров, объектов электростанций, изделий авиакосмического комплекса, нефтехимической промышленности, судостроения, железнодорожного транспорта, нефтегазового хозяйства, компрессорных станций, мостовых, крановых и других металлоконструкций, имеют сертификаты Государственных комитетов: Госпотребстандарта Украины, Госнадзорхрантруда Украины, Строительства и архитектуры.

Для решения конкретных задач могут быть проведены:

- разработка и изготовление систем ультразвукового контроля металлоконструкций;
- проведение мониторингового контроля сооружений, конструкции, материалов и изделий ультразвуковым, рентгеновским, магнитопорошковым, капиллярным, герметичности, акустико-эмиссионным и другими методами НК;
- определение типа, местоположения и размеров дефектов с использованием компьютеризированных ультразвуковых дефектоскопов;
- проведение сертификационных испытаний объектов повышенной опасности (котлы, сосуды, резервуары, трубопроводы, краны, трубы) методами НК;
- разработка технологии, оформление и утверждение технологических инструкций на проведение НК различных объектов в соответствии с международными нормами и стандартами ANSI/AWS, ASME, EN, ISO и др.;
- оказание консультативных услуг в выборе и применении средств и методов НК, а также содействие в приобретении средств НК отечественных и зарубежных фирм;
- аттестация испытательных лабораторий (служб неразрушающего контроля) на техническую компетентность в области НК, в соответствии со стандартами EN45001, EN45002 и Правилами межгосударственной стандартизации ПМГ 15-96;
- аттестация специалистов на 1, 2 и 3 уровни квалификации по НК в соответствии со стандартом ГОСТ 30489-97 (EN 473) и Правилами ДНАОП 0.00-1.27-97;
- обеспечение нормативно-технической документацией по НК, в том числе ISO и соответствующей литературой;
- ремонт дефектоскопического и другого электронного оборудования.

К нам обращаться: 03680, г. Киев-150, ГСП, ул. Боженко, 11, отд. № 4
Тел.: (044) 221 266, Факс: (044) 220 9 4S2, E-mail: usndt@ukr.net.; paton@kiev.ua



ПОЗДРАВЛЯЕМ АНАТОЛИЯ ЯКОВЛЕВИЧА НЕДОСЕКУ С ЮБИЛЕЕМ!

АНАТОЛИЮ ЯКОВЛЕВИЧУ НЕДОСЕКЕ исполнилось 70 лет. Его имя известно широкой научной общественности.

Анатолий Яковлевич — видный ученый в области оптимизации технологий изготовления и эксплуатации сварных конструкций с учетом требований их прочности, надежности и прогнозирования их остаточного ресурса, а также в области разработки нового научно-прикладного направления — технической диагностики сварных конструкций, объектов и сооружений.

В 1953 г. Анатолий Яковлевич закончил с красным дипломом Киевский судостроительный техникум, корпусное отделение, и в составе 5% выпуска был направлен на учебу в Киевский политехнический институт, после окончания которого в 1958 г. распределен в Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.

С 1958 г. (более 45 лет) научная и практическая деятельность А. Я. Недосеки связана с ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины — признанным в мире лидером в области сварки и родственных технологий.

В начале своего трудового пути Анатолий Яковлевич проводил успешные лабораторные и прикладные исследования в области расчета и разработки технологий изготовления уникальных и ответственных в эксплуатации сварных конструкций: был разработан расчетный метод определения остаточных сварочных напряжений и учета их влияния на несущую способность конструкций при продольном изгибе; разработаны эффективные способы снижения остаточных сварочных напряжений, а также ряд новых методов исследования сварочных деформаций и напряжений. На основе этих разработок созданы и внедрены в производство оригинальные устройства и аппаратура.

Сложный производственный комплекс страны, повышение требований по обеспечению безопасности эксплуатации конструкций, объектов и сооружений, решение вопросов экологической безопасности требовали принципиально новых подходов по обеспечению качества, надежности и несущей способности сварных конструкций. По инициативе академика Б. Е. Патона начались работы по обеспечению безопасности эксплуатации кон-

струкций и сооружений. А. Я. Недосеке были поручены вопросы по организации работ, координации разработок ученых различных специальностей в решении этой важной задачи. Эти работы у нас в стране начали координироваться организованным Государственным комитетом СССР по науке и технике в 1963 г. при Институте электросварки им. Е. О. Патона АН Украины Научным Советом по проблеме «Новые процессы сварки и сварные конструкции». В составе секции «Сварные конструкции» Научного Совета начала функционировать рабочая группа № 3 «Техническая диагностика и точность сварных конструкций», которую возглавлял Анатолий Яковлевич. Так началось развиваться новое научное направление — диагностика технического состояния сварных конструкций в процессе их эксплуатации, оценка их реального остаточного ресурса. В мировой научной и инженерной практике указанное направление сейчас признано в качестве одного из приоритетных направлений, которое генерирует новые масштабные интеллектуальные технологии.

Круг интересов Анатолия Яковлевича в данном направлении научной деятельности: разработка теории, методов и средств диагностики и оценки состояния конструкционных материалов, вопросы теории прогнозирования и принятия решений при оценке состояния конструкций, мониторинг и оптимизация технологий диагностирования крупномасштабных ответственных в эксплуатации объектов.

А. Я. Недосека активно работает по подготовке экспертов, специалистов, инженерных и научных кадров, под его руководством подготовлены и защищены соискателями ИЭС шесть кандидатских диссертаций. Он автор более 150 печатных работ и изобретений в области технологии производства и обеспечения безопасности эксплуатации конструкций и сооружений. А. Я. Недосека — заместитель Председателя Технического комитета Украины по стандартизации № 78 «Техническая диагностика и неразрушающий контроль», созданного в 1993 г., заместитель главного редактора журнала «Техническая диагностика и неразрушающий контроль», который учрежден по его инициативе в 1985 г.

Коллектив Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, редколлегия и редакция журнала «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» желают Анатолию Яковлевичу доброго здоровья, энергии, оптимизма и больших успехов в его сложной и многогранной работе!



Aerospace Industry Week Russia 2004



Москва,
Россия

- **Aerospace Testing
Russia 2004**

1-я Международная
выставка тестового
оборудования, систем
и технологий авиационно-
космической
промышленности

- **Aircraft Interiors
Russia 2004**

1-я Международная
выставка дизайна,
элементов и оборудования
для интерьеров самолетов

6-8 ОКТЯБРЯ 2004

World Trade Centre

**Центр Международной
Торговли**

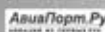


Организатор / Organised by:



129110, Москва, ул. Щелкина, д. 42, стр. 2а
Tel: +7 095 935 73 50
Fax: +7 095 935 73 51
E-mail: zhanrov@ite-expo.ru

Информационные спонсоры / Media Sponsors:





**БРАЗЫ, СТАНДАРТЫ,
ЭТАЛОНЫ, ПРИБОРЫ**

30 ноября-2 декабря 2004

**МЕЖДУНАРОДНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА
КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО, ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ,
РАБОТ И УСЛУГ В ОБЛАСТИ СТАНДАРТИЗАЦИИ, СЕРТИФИКАЦИИ, МЕТРОЛОГИИ
«ОБРАЗЦЫ, СТАНДАРТЫ, ЭТАЛОНЫ, ПРИБОРЫ - 2004»**

Украина, г. Киев, Международный выставочный центр, Броварской пр. 15, ст. М «Левобережная»

Организаторы выставки: МВЦ, Укрметртесстандарт, УО НКД

Международный промышленный форум

«Производство и защита - 2004»

Организация форума проходит по поручению КМУ №40690/505/1-03 от 31.03.04

Организаторы форума:

Минпромполитики Украины, Госкомитет Украины по надзору за охраной труда,
Госпотребстандарт Украины, Укрстанкоинструмент, МВЦ



Специализированные выставки:

«Металлообработка»

«Безопасность производства»

«УкрИнтерТех»

«Субконтракты»

«Образцы, стандарты, эталоны, приборы»

«УкрВторТех»

ТЕМАТИЧЕСКИЕ РАЗДЕЛЫ ВЫСТАВКИ:

**КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И АППАРАТУРА
СТАНДАРТИЗАЦИЯ, МЕТРОЛОГИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ
НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ И ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА
ЛАБОРАТОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ПРИБОРЫ**

Контрольно – измерительные приборы и аппаратура

Измерительные приборы и оборудование для испытательных лабораторий

Метрологическое оборудование

Услуги в сфере испытаний

Научные разработки в сфере контроля и испытаний

Технологии в сфере защиты продукции от подделки и фальсификации

Исследования и определение потребительских качеств товаров, сертификация

Системы автоматизации диагностики и испытаний

Системы управления качеством и окружающей средой

Измерительная техника, радиоизмерительные и электроизмерительные приборы, весодозирующее и весовое оборудование

Лабораторное оборудование и дополнительная продукция (мебель, посуда, аппаратура)

Измерительное оборудование и приборы - для измерения плотности, влажности, радиоактивности, свойств поверхности, контроля и измерения температуры, вязкости

Аналитическое оборудование - приборы для газовой хроматографии, электрофореза, электрохимии, портативное и мобильное аналитическое оборудование, приборы контроля и качества, исследований,

промышленное аналитическое оборудование, приборы для термоанализа колориметры, рефлектометры

Испытательное оборудование - приборы для контроля и влажности материалов, определения характеристик дисперсных материалов, испытаний на проникание жидкостей и газов, качества нефтепродуктов, реологических испытаний, теплофизических испытаний и характеристик поверхностей материалов

Анализаторы химического состава, физических свойств и анализаторов влажности

Продукция для испытания и изучения материалов

Обучение и сертификация персонала, аттестация лабораторий

За справками по вопросам участия в выставках, организации семинаров, конференций, презентаций просим обращаться в ЗАО «Международный выставочный центр»:

Украина, 02660, Киев, Броварской проспект,15, офис 224, (+038044) 201 11 57, 201 11 67

E-mail: silova@iec-expo.com.ua

// www.tech-expo.com.ua

// www.iec-expo.com.ua



4-я Международная выставка и конференция НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ И ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА В ПРОМЫШЛЕННОСТИ



17-20 МАЯ 2005
Москва, СК Олимпийский



РАЗДЕЛЫ ВЫСТАВКИ:

- Акустическая эмиссия
- Ультразвуковой контроль
- Вихревой контроль
- Визуальный и оптический контроль
- Магнитопорошковый контроль
- Электромагнитный контроль
- Инфракрасный и термический контроль
- Динамический контроль твердости
- Вибрационный контроль
- Капиллярный контроль
- Течеискание
- Радиографический контроль
- Электрический контроль
- Радиационный контроль
- Контроль трубопроводов
- Обучение и сертификация персонала
- Аттестация лабораторий



www.primexpo.ru/ndt

Совместно с:



ЛАБОРАТОРНЫЙ КОНТРОЛЬ
В ПРОМЫШЛЕННОСТИ



ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ
И АВТОМАТИЗАЦИЯ

Организаторы:



ПРИМЭКСПО

Тел.: (812) 380 60 02/00
Факс: (812) 380 60 01
E-mail: ndt@primexpo.ru



Российское общество
по неразрушающему
контролю и технической
диагностике

УПО
Technika
INDUSTRIAL TECHNOLOGIES
EXHIBITIONS



11 листопада

Всесвітній день якості

Вже 13-й рік поспіль збиратимуться в Києві керівники підприємств і організацій, представники бізнесових структур і наукових кіл, фахівці з якості, екології, маркетингу, управління персоналом - всі, хто має на меті подальше вдосконалення своїх організацій для досягнення успіхів у бізнесі, - щоб відзначити Всесвітній день якості.

Український
союз промисловців
і підприємцівУкраїнська
асоціація якостіФедерація
роботодавців
України**13-й Міжнародний форум****“Дні якості в Києві ‘2004”, -**

центральний захід Європейського тижня якості.

Його девіз: **“Якість через різноманіття”**

13-й Міжнародний форум відбудеться 8-12 листопада 2004 р.

Упродовж п'яти днів на Форумі будуть представлені:

- найсучасніші розробки в сфері Загального управління якістю (TQM), що акумулюють кращий світовий досвід найбільш успішних організацій;
- методичні аспекти впровадження моделей ефективного бізнесу;
- практика вдосконалення українських підприємств на основі принципів TQM, Моделі досконалості та Схеми визнання досягнень Європейського фонду управління якістю (EFQM), міжнародних стандартів ISO серії 9000, ISO 14000.
- Також на делегатів та учасників чекають перед- та післяфорумні школи-семінари, виїзні семінари на кращих київських підприємствах-учасниках Українського національного конкурсу якості.

Якщо Вас зацікавила ця інформація, за довідками стосовно детальної програми, умов участі, подання заявки тощо звертайтеся до Оргкомітету:

адреса: 03680, Київ, пр-т Академіка Глушкова, 40
тел./факс: (044) 252-5928, 252-3601, 266-3313, 266-4556
e-mail: ntz@quality.kiev.ua, <http://www.uaq.org.ua>

Генеральний
інформаційний
спонсор**Інформаційні партнери**<http://www.adamant.ua>



К ВОПРОСУ О СПЛОШНОЙ РЕГИСТРАЦИИ И ДОКУМЕНТИРОВАНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ КОНТРОЛЯ РЕЛЬСОВ СЪЕМНЫМИ УЛЬТРАЗВУКОВЫМИ ДЕФЕКТОСКОПАМИ

В. И. ГОРДЕЛИЙ, В. И. ЧЕБАН

В настоящее время действует система дефектоскопии рельсов первичными средствами, включающая проведение НК как скоростными средствами, так и съемными дефектоскопами для сплошного контроля.

В настоящее время съемные дефектоскопы являются основным средством первичного контроля рельсов и будут оставаться таковыми достаточно длительное время. В последние годы для контроля железных дорог поступают новые эффективные дефектоскопы типа **УДС2-РДМ-2**, обеспечивающие выявление более обширной номенклатуры типоразмеров дефектов рельсов.

Для регистрации результатов сплошного контроля рельсов съемными дефектоскопами типа **УДС2-РДМ-2** в НПП «ВИГОР» разработаны, изготовлены и поставлены на железные дороги регистраторы результатов контроля **РСД-Т** для дефектоскопов.

Сегодня на железных дорогах Российской Федерации функционирует более 1500 ультразвуковых дефектоскопов **УДС2-РДМ-2** с регистраторами **РСД-Т**, разработанными и изготовленными в НПП «ВИГОР».

Регистратор **РСД-Т** — приставка съемного типа, подсоединяемая к дефектоскопу, — предназначен для регистрации результатов сплошного ультразвукового контроля рельсов в пути дефектоскопом типа **УДС2-РДМ-2** с последующей обработкой результатов на персональном компьютере с целью визуализации и получения документа контроля.

С помощью регистратора возможен просмотр параметров настройки дефектоскопа перед контролем и после него — просмотр развертки типа В (рис. 1) на экране ПЭВМ. Регистратор эксплуатируется при температуре окружающей среды от минус 40 °С до плюс 50 °С при верхнем значении относительной влажности 96 % (при температуре плюс 25 °С). Электронный блок регистратора выполнен на современной элементной базе с применением передовых технологий.

Подключается регистратор к дефектоскопу через 50-тиконтактный разъем, расположенный на задней стенке дефектоскопа. Через этот разъем передаются информационные сигналы, вырабатываемые дефектоскопом в процессе контроля рельсового пути.

Регистратор принимает эти сигналы, упаковывает их и записывает во встроенную флэш-память емкостью 32 МБ. Такой емкости памяти достаточно, чтобы накапливать информацию о контроле участка пути протяженностью не менее 50 км. После перегрузки накопленной информации в ПЭВМ память регистратора можно очистить и продолжить регистрацию.

В комплект поставки регистратора входит:

- ❖ электронный блок;
- ❖ датчик путейской координаты;
- ❖ комплект соединительных кабелей;
- ❖ комплект эксплуатационной документации;
- ❖ программное обеспечение.

Регистратор обеспечивает возможность накопления следующей информации:

- ❖ дата и время контроля;
- ❖ текущее время с привязкой к началу и концу записи, а также к моментам проезда пикетов, стрелочных переводов и др.;
- ❖ информация о контролируемом участке пути; фамилия (код) оператора;
- ❖ схема прозвучивания;



- ❖ текущие значения чувствительности во всех каналах дефектоскопа во время проезда с привязкой к путевой координате;
- ❖ сигналы в каналах дефектоскопа (В-развертка) с привязкой ее к текущей путевой координате;
- ❖ служебные отметки.

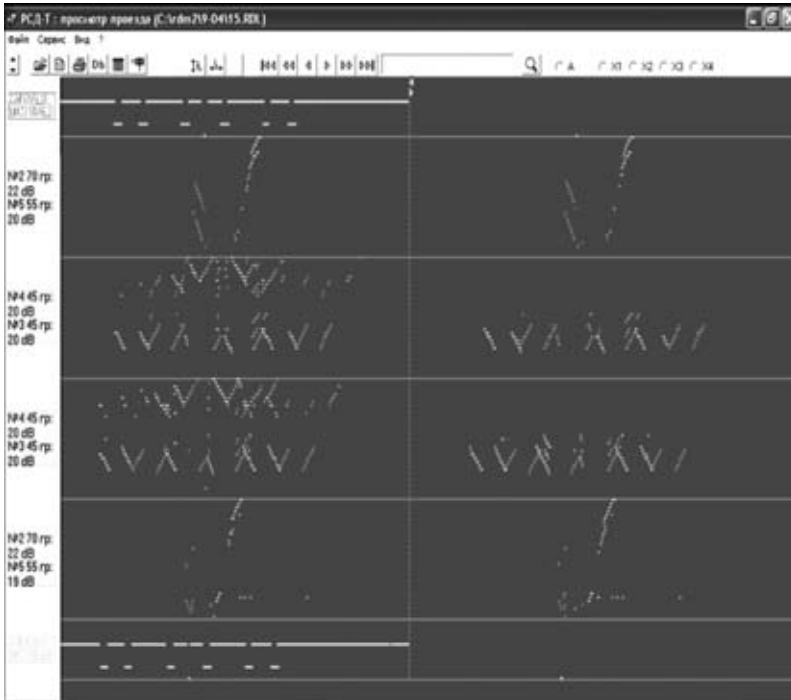


Рис. 1. Развертка типа В на экране ПЭВМ



Рис. 2. Сертификат соответствия

Документирование результатов ультразвукового контроля рельсов съемными дефектоскопами типа **УДС2-РДМ-2**, оснащенными регистраторами **РСД-Т**, расширяет возможности контроля, позволяет проводить проверку правильности настройки дефектоскопов, а также контроль работы операторов дефектоскопов, повышает ответственность операторов за результаты контроля, а значит, позволяет существенно повысить надежность и достоверность обнаружения дефектов в рельсовом пути.

Кроме того, запись результатов контроля позволяет выявлять контроленепригодные участки, а также проводить наблюдение за развитием выявленных дефектов в рельсах в процессе эксплуатации, а также сравнение результатов контроля одного и того же участка скоростными средствами и съемными дефектоскопами для сплошного контроля

Регистратор **РСД-Т** зарегистрирован в метрологической службе Госстандарта России — СЕРТИФИКАТ СООТВЕТСТВИЯ № 03.003R.0006 от 12.02.2004 г. (рис. 2).

В регистраторе использовано изобретение (заявка №2004117108 положительное решение от 02.07.04).

**За более подробной информацией просим обращаться по адресу:
107174, г. Москва, ул. Новая Басманная, д. 2; а/я 25, НПП «ВИГОР».
Тел./факс: (095) 262-85-35; e-mail: cevig@rambler.ru.**



“ДИАГНОСТИКА И КОНТРОЛЬ”

ООО НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЦЕНТР

54056, г. Николаев, а/я 234

тел/факс (0512) 210-220

E-mail: Diagnostic@mksat.net

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СКАНИРУЮЩИЙ ТОЛЩИНОМЕР УТ-98 «СКАТ»

Толщиномер используется для измерения толщины изделий из различных металлов и сплавов при одностороннем доступе в процессе эксплуатации или изготовления. Рекомендуется для применения на энергетических, химических, машиностроительных, транспортных, трубопрокатных, нефтегазодобывающих и перерабатывающих комплексах и других предприятиях.



ВСТРОЕННАЯ МИКРОЭВМ ОБЕСПЕЧИВАЕТ:

- автокалибровку и самотестирование;
- статистическую обработку результатов, накопление и последующую передачу в ПЭВМ по каналу RS232;
- запоминание результатов 4000 измерений с файловой организацией памяти (до 40 файлов), удобство хранения и быстрый доступ к информации;
- автоматическое нахождение минимального значения толщины в области сканирования преобразователем контролируемого объекта в режиме «быстрый скан».

ТОЛЩИНОМЕР ОТЛИЧАЕТСЯ ОТ ИЗВЕСТНЫХ АНАЛОГОВ:

- дополнительным режимом «Рельеф», позволяющим непрерывно измерять толщину на длине до 8 метров с координатной привязкой к контролируемому объекту, и отображать этот рельеф на экране компьютера;
- автоматической установкой при включении толщиномера в тот режим, файл и точку измерения, в которых находился в момент выключения.

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИБОРА И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

1. Диапазон контролируемых толщин, T , мм 0,5...300
2. Скорость распространения ультразвука, м/с 1000...15000
3. Основная погрешность измерения t , мм, по диапазонам $T = 0,5...20,0$ $\pm 0,05$
 $T = 20...300$ $(0,002T + 0,05)$
4. Габариты прибора, мм 157x85x30
5. Питание аккумулятор «НИКА», батареи «КРОНА», «КОРУНД»
6. Диапазон рабочих температур для прибора $-20^{\circ}\text{C}...+50^{\circ}\text{C}$
7. Диапазон рабочих температур для преобразователей $-40^{\circ}\text{C}...+60^{\circ}\text{C}$
8. Масса прибора с источником питания, кг 0,3



Толщиномер комплектуется преобразователями с повышенной износостойкостью и чувствительностью, что увеличивает срок их службы и позволяет контролировать изделия под слоем краски, ржавчины и по грубо обработанной поверхности.



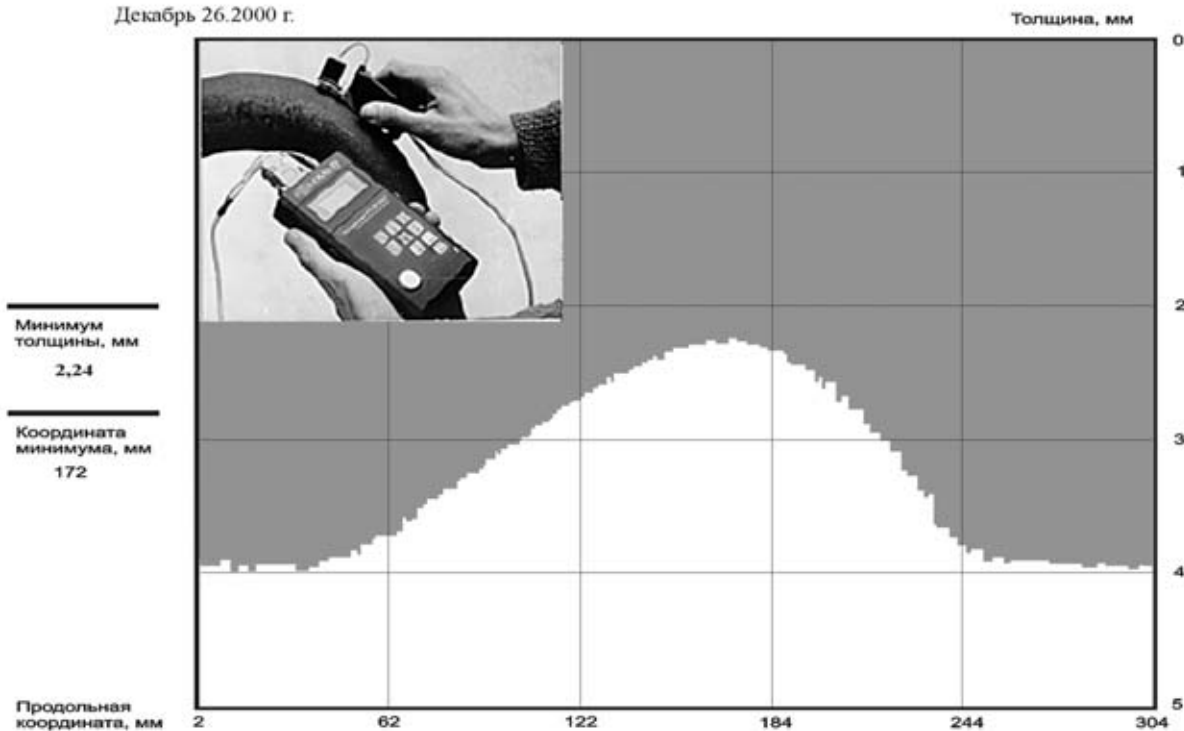
Преобразователи	Измеряемая толщина T, мм	Минимальный радиус изделия, мм	Рабочая поверхность, мм	Габариты преобразователя, мм
П-112-5-10/2-A-01	1,0–300	5	Ø 13	Ø 22x45
П-112-10-6/2-A-01	0,6–80	3,0	Ø 9,5	10x12x20
П-112-5-8/2-A-01	1,0–100	7	Ø 18	Ø 20x25
* П112-10-2x3/М	0,5–20	1,0	2x6	9x8x15

*Поставка по желанию заказчика.

Для толщиномера разработаны специализированные преобразователи, сканирующие устройства и пакеты программ, позволяющие автоматизировать процесс измерения и обработки результатов контроля для таких объектов, как:

- теплообменные аппараты тепловых и атомных электростанций;
- установки комплексной подготовки газа газоперерабатывающих станций;
- лопатки газовых турбин.

Декабрь 26.2000 г.



Пример отображения остаточной толщины (рельефа)гиба трубы

Комплект поставки

Измерительный блок с двумя преобразователями, миниатюрное сканирующее устройство со встроенным датчиком пути и преобразователем для снятия показаний в режиме рельеф, аккумулятор с зарядным устройством, паспорт, руководство пользователя, метрологическое свидетельство, дискета с программным обеспечением, кабели, чехол измерительного блока, упаковочная тара.

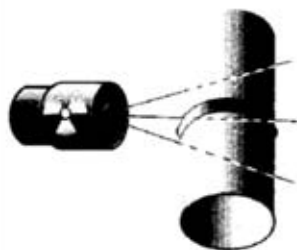
По желанию заказчика поставка в комплекте с компьютером и спецпрограммами. Срок поставки — 3 недели, гарантийный срок эксплуатации — 1 год, сервисное обслуживание.

Толщиномер сертифицирован Госстандартом Украины Госреестр №У1447-01



ИЗОТОП

Неразрушающий контроль:



Рентгеновские дефектоскопы типа

АРИНА, РАТМИР

Толщиномеры покрытий

*Рентгенографическая пленка и
химреактивы фирм "Свема", "AGFA", "FOMA"*

**Принадлежности для радиографии: шаблоны сварщика, экраны
усиливающие, мерные пояса, эталоны чувствительности**

Наборы для цветной капиллярной дефектоскопии

**03680, ГСП, г. Киев, ул. Горького, 152, телефон/факс: (044) 268-90-00
E-mail: ndt@izotop.kiev.ua**



НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ФИРМА «ПРОМСЕРВИСДИАГНОСТИКА»

Тел/факс: (044) 227-88-13, 261-54-74. Телеграммы: Киев 5, СТЫК. Телетайп: 132174, СТЫК

Наша фирма на протяжении многих лет, используя собственную материальную базу и современные методы неразрушающего контроля и оценки результатов испытаний, проводит работы по техническому диагностированию сосудов, работающих под давлением; резервуаров для хранения нефтепродуктов, реагентов и химической продукции; грузоподъемных механизмов; паровых, водонагревательных котлов и котлов-утилизаторов; технологического оборудования нефтеперерабатывающих заводов, газонефтепроводов и нефтепродуктопроводов; сооружений, установок и оборудования нефтегазовых промыслов; систем подготовки нефти и газа к транспортировке, АГНКС; криогенного оборудования (Разрешение № 575.01.30-31.62.3, выданное Государственным департаментом по надзору за охраной труда 21.07.2001 г.), а также выполняет работы по ремонту грузоподъемных кранов, наливных емкостей и сосудов, работающих под давлением (Разрешение № 118.02.18 от 19.07.02).

За это время специалисты фирмы провели с субподрядчиками исследования характера расслоений газовых сепараторов, исследовали причины разрушений подземных магистральных трубопроводов, сосудов высокого давления с технологическими обвязками, резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов, технологического оборудования и газораспределительных станций ОАО «Укрнафта» (НГДУ «Охтырканефтегаз»), ДП «Харьковтрансгаз» и других предприятий, обнаружили десятки единиц оборудования, имеющего опасные дефекты, и устранили их.

**При наличии с Вашей стороны предложений по диагностированию
технологического оборудования, а также по ремонту особо
Ответственных объектов с использованием ремонтных сварочных
технологий — мы готовы к сотрудничеству.**



ПРЕДЛАГАЕМ УСЛУГИ ПО ОБРАБОТКЕ РЕНТГЕНОВСКИХ СНИМКОВ

Уважаемые коллеги!

На основе разработанного программно-аппаратного комплекса для компьютерной обработки рентгеновских снимков сварных соединений предприятия, работающие с радиографическими снимками, имеют возможность:

- ◆ создать компьютерную базу данных изображений, полученных при радиографии;
- ◆ поднять качество изображения рентгеновских снимков;
- ◆ повысить оперативность и достоверность анализа изображений.

Этот программно-аппаратный комплекс, состоящий из слайд-сканера, компьютера, принтера, представляет собой Автоматизированное Рабочее Место Дефектоскописта (АРМД).

Предлагаем Вам услуги по обработке предоставленных Вами снимков.

Просим сообщить нам, насколько это интересно для Вашей организации, желаете ли Вы создать на своем предприятии подобное Рабочее Место.

В Отделе неразрушающих методов контроля Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины в период с 4 ноября с.г. начинается демонстрация возможностей Рабочего Места по обработке рентгенограмм. Приглашаем всех желающих провести компьютерную обработку Ваших рентгенограмм.

ул. Боженко, 11, отд. 4, ИЭС им. Е. О. Патона, г. Киев-150, 03680

Тел.: (044) 227-16-66, факс: 220-94-82

ГП «АТТЕСТАЦИОННЫЙ ЦЕНТР НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ» ПРИ ИНСТИТУТЕ ЭЛЕКТРОСВАРКИ ИМ. Е. О. ПАТОНА НАН УКРАИНЫ

ПРОВОДИТ



неразрушающий контроль (визуально-измерительный, ультразвуковой, радиационный, капиллярный, магнитопорошковый, контроль герметичности); техническое диагностирование и техническое освидетельствование следующего оборудования:

- ✦ металлоконструкций и строительных конструкций
 - ✦ паровых и водогрейных котлов
 - ✦ сосудов, работающих под давлением
 - ✦ трубопроводов пара и горячей воды
 - ✦ грузоподъемных кранов
 - ✦ технологических трубопроводов и оборудования
 - ✦ магистральных трубопроводов
 - ✦ резервуаров для хранения нефтепродуктов
- (Разрешение на начало работ № 32.03.30-31.62.3)*

АТТЕСТУЕТ

специалистов неразрушающего контроля по следующим методам:

- ✦ визуально-оптическому
- ✦ ультразвуковому
- ✦ радиационному
- ✦ магнитопорошковому
- ✦ капиллярному
- ✦ контролю герметичности



ИЗГОТАВЛИВАЕТ

стандартные образцы предприятия с зарубками, боковыми и плоскостными сверлениями в соответствии с требованиями нормативных документов

03680, г. Киев-150, ГСП, ул. Боженко, 17

Тел.: (044) 261-51-75; 261-51-83

ПОДПИСЫВАЙТЕСЬ НА ЖУРНАЛЫ ИЭС им. Е.О. ПАТОНА



«Техническая диагностика и неразрушающий контроль»

4 выпуска в год, подписной индекс 74475,
издается с 1989 г.,
тел.: (38044) 261 58 81, 269 26 23



«Современная электрометаллургия»

4 выпуска в год, подписной индекс 70693,
издается с 1985 г.,
тел.: (38044) 269 26 23, 268 34 84,
(с 1985 по 2002 гг. журнал издавался под названием
«Проблемы специальной электрометаллургии»)



«Advances in Electrometallurgy»

перевод на английский язык журнала «Современная электрометаллургия»
4 выпуска в год, подписной индекс 01141,
тел.: (38044) 269 26 23, 268 34 84

«Автоматическая сварка»

12 выпусков в год, подписной индекс 70031,
издается с 1948 г.,
тел.: (38044) 227 63 02, 269 26 23



«The Paton Welding Journal»

перевод на английский язык журнала «Автоматическая сварка»,
12 выпусков в год, подписной индекс 21971,
тел.: (38044) 269 26 23, 227 63 02



Подписка в Украине по каталогам агентства: «Пресса» и «Идея»
Подписка в Российской Федерации по каталогу агентства «Роспечать»
Подписка через редакции журналов на годовые комплекты, отдельные выпуски и статьи.

<http://www.nas.gov.ua/pwj>

Расценки на размещение рекламы в журналах:

«Техническая диагностика и неразрушающий контроль»,
«Автоматическая сварка»,
«Современная электрометаллургия»,
«The Paton Welding Journal»
«Advances in Electrometallurgy»

Стоимость рекламы на обложке, в USD

Страницы	Размер, мм	Полноцветная	Одноцветная
1	190×190	500	—
2	200×290	350	320
3	200×290	350	320
4	200×290	400	360

Стоимость блочной рекламы на внутренних страницах

Площадь	Размер, мм (ширина×высота)	Цена, USD	
		черно-белая	цветная
1 полоса	170×250	80	300
1/2 полосы	170×125	40	—
1/4 полосы	170×60	20	—
1/6 полосы	80×80	15	—

Для организаций-резидентов Украины цена с НДС и налогом на рекламу

Оплата в гривнях или рублях РФ по официальному курсу

Статья на правах рекламы — 50% стоимости рекламной площади

Скидки при размещении рекламы в двух (и более) журналах ИЭС согласовываются дополнительно

Скидки на размещение рекламы при единовременной оплате:

Количество подач	3	6	12
■ Скидка	10 %	15 %	20 %

Требования к оригинал-макетам:

Формат журнала после обрезки 200×290 мм

Черно-белые:

TIF grayscale 300 dpi для фотоизображений, TIF bitmap 600 dpi для графики

Цветные:

TIF CMYK 300 dpi

Сопроводительные материалы:

обязательна черно-белая распечатка файла

Носители:

дискеты 3.5", CD-ROM

