

# ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

№ 1, 2010

Издается с января 1989 г.

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

**Издатель:** Международная ассоциация «Сварка»

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

### Главный редактор

**Б. Е. ПАТОН**

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

### Адрес редакции

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

### Научные редакторы

Н. Г. Белый, А. А. Грузд

### Электронная верстка

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

### Свидетельство

о государственной регистрации  
КВ 4787 от 09.01.2001

Журнал входит в перечень  
утвержденных ВАК Украины  
изданий для публикации трудов  
соискателей ученых степеней  
При перепечатке материалов  
ссылка на журнал обязательна

## СОДЕРЖАНИЕ

Е. О. Патон — выдающийся ученый, педагог, организатор  
науки и производства (к 140-летию со дня рождения) ..... 3  
НОВОСТИ ..... 7

## ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА

*НЕДОСЕКА С. А., НЕДОСЕКА А. Я.* Комплексная оценка  
поврежденности и остаточного ресурса металлов с эксплуа-  
тационной наработкой ..... 9  
*ЮХИМЕЦ П. С.* Геометрически обусловленный ресурс тру-  
бопровода с коррозионным повреждением ..... 17  
*ВЕКСЛЕР Е. Я., ЗАМЕКУЛА И. В., ТОЛСТОВ В. Ю., СЕ-  
МЕШКО Е. В.* Технология диагностирования и оценка  
остаточного ресурса паропроводов высокого давления  
тепловых электростанций по уровню микроповрежден-  
ности металла ..... 23

## НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

*БУСОВ В. Л., ТРОИЦКИЙ В. А., ШИШКИН И. В.* О локаль-  
ной долговечности и пределе ограниченной выносливости ..... 32  
*БОНДАРЕНКО А. И.* Методы низкочастотной акустической  
дефектоскопии с сухим контактом в системе «преобразова-  
тель—изделие» ..... 38  
*КОЛЯДА В. А., ШАПОВАЛОВ Е. В.* Совмещение дискретных  
кривых в задаче автоматизированного контроля гео-  
метрических параметров железнодорожных рельсов ..... 45  
*НЕХОТЯЩИЙ В. А., ЮХИМЕЦ П. С., БЕЗЛЮДЬКО Г. Я.* Ис-  
пользование коэрцитивной силы для оценки технического  
состояния конструкций, работающих под давлением ..... 49  
*ГЛУХОВСКИЙ В. Ю., КОСТЕНКО А. В.* Применение теп-  
ловизионного контроля при сварке полиэтиленовых труб ..... 54

## ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ

Проблемы ресурса и безопасность эксплуатации конст-  
рукций, сооружений и машин (итоговая научная конфе-  
ренция в ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ) ..... 58  
Наши поздравления ..... 61  
План проведения мероприятий по НК в 2010 г. .... 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

№ 1, 2010

Founded in January, 1989

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

**Publisher:** International Association «Welding»

## EDITORIAL BOARD:

### Editor-in-Chief

**B. E. PATON**

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

### Address:

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

### Scientific editors:

N. G. Bely, A. A. Gruzd

### Electron galley:

I. R. Naumova, D. I. Sereda,  
L. N. Gerasimenko, T. V. Ushtina  
State Registration Certificate  
KV 4787 of 09.01.2001

All rights reserved.

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

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

## CONTENT

E. O. Paton — outstanding scientist, teacher, organizer of research and production (for 140th birthday anniversary) .....	3
NEWS .....	7

### TECHNICAL DIAGNOSTICS

<i>NEDOSEKA S. A., NEDOSEKA A. Ya.</i> Integrated assessment of damage level and residual life of metals with certain opera- ting life .....	9
<i>YUKHIMETS P. S.</i> Geometry-dependent residual life of a pipe- line with corrosion damage .....	17
<i>VEKSLER E. Ya., ZAMEKULA I. V., TOLSTOV V. Yu., SE- MESHKO E. V.</i> Technology of diagnostics and assessment of residual life of high-pressure steam pipelines of thermal power plants by the level of metal microdamage .....	23

### NON-DESTRUCTIVE TESTING

<i>BUSOV V. L., TROITSKII V. A., SHISHKIN I. V.</i> On local fati- gue life and fatigue strength .....	32
<i>BONDARENKO A. I.</i> Methods of low-frequency acoustic flaw detection with dry contact in «transducer-item» system .....	38
<i>KOLYADA V. A., SHAPOVALOV E. V.</i> Superposition of disc- rete curves in the problem of automated control of geometrical parameters of railway rails .....	45
<i>NEKHOTYASHCHII V. A., YUKHIMETS P. S., BEZLYUDKO G. Ya.</i> Application of coercive force for assessment of techni- cal condition of structures operating under pressure .....	49
<i>GLUKHOVSKII V. Yu., KOSTENKO A. V.</i> Application of heat monitoring in welding polyethylene pipes .....	54

### NEWS AND INFORMATION

Problems of residual life and safe service of structures, const- ructions and machines (Final Scientific Conference at the E. O. Paton Electric Welding Institute of NASU) .....	58
Our congratulations .....	61
Schedule of NDT events for 2010 .....	62

JOURNAL PUBLICATION IS SUPPORTED BY:

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



Ukrainian Society for Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics

# Е. О. ПАТОН — ВЫДАЮЩИЙСЯ УЧЕНЫЙ, ПЕДАГОГ, ОРГАНИЗАТОР НАУКИ И ПРОИЗВОДСТВА

(к 140-летию со дня рождения)

Евгений Оскарович Патон родился 5 марта 1870 г. в Ницце (Франция) в семье русского консула. Среднее образование получил в гимназии г. Бреслау (Германия), где, наряду с фундаментальной подготовкой по точным наукам, в совершенстве овладел немецким, французским и английским языками. В 1888 г. поступил на инженерно-строительный факультет Королевской Саксонской технической академии (ныне Технический университет Дрездена), который блестяще закончил в 1894 г. По окончании ему было предложено место ассистента в институте. Но молодой инженер, воспитанный в семье в духе патриотизма, твердо решил отдать все силы служению родной стране и в 1895 г. навсегда переезжает в Россию.

Для получения прав на инженерную деятельность в России Е. О. Патон в том же году поступает на 5-й курс Петербургского института инженеров путей сообщения, в течение восьми месяцев сдает 12 экзаменов, выполняет несколько проектов и уже в мае 1896 г. получает диплом русского инженера. По окончании института Евгений Оскарович начал работать ассистентом того же института под руководством проф. Ф. С. Ясинского и в техническом отделе службы пути Николаевской железной дороги. Талантливый профессор оказал большое и благотворное влияние на молодого специалиста. Уже в следующем, 1897 г., Е. О. Патон начинает педагогическую деятельность в только что организованном Московском инженерном училище путей сообщения. Здесь он встретился с профессорами Л. Д. Проскураковым, Л. Ф. Николаи, Н. А. Белелюбским, М. Н. Герсевановым, совместная работа с которыми благотворно повлияла на формирование молодого ученого.

В возрасте 31 года он защитил диссертацию, получил степень адъюнкта и был назначен профессором училища. Московскому инженерному училищу Евгений Оскарович Патон отдал семь лет. В эти годы он выработал свою методику преподавания, началась его многолетняя работа над созданием учебников и учебных пособий по мостостроению. Он составил для себя жесткий распорядок дня, который начинался в шесть ча-

сов утра, и неукоснительно придерживался его всю жизнь.

Е. О. Патон постоянно работал над собой, тщательно готовился к лекциям, был очень требователен и взыскателен к студентам. Напряженно работал над созданием курсов мостов, скрупулезно обрабатывал массу материалов, многократно проверял и уточнял расчеты. За короткое время вышли из печати два тома курса по железным мостам и примеры расчетов деревянных, железных и каменных мостов. Имя молодого профессора-мостовика Е. О. Патона получило широкую известность, его книги быстро расходились.

В 1904 г. Киевский политехнический институт пригласил молодого профессора возглавить кафедру мостов. Вскоре Евгений Оскарович был избран деканом инженерно-строительного отделения того же института. С большой энергией он взялся за создание музея и кабинета мостов со специальной библиотекой. Помимо преподавания, Евгений Оскарович и здесь отдавал много сил созданию учебников, проектированию и строительству мостов. Под его руководством были построены мост в Тбилиси, два моста через реку Рось, киевский пешеходный мост над Петровской аллеей, перекрытия залов КПИ и гостиницы «Метрополь» в Москве и др.

В годы Первой мировой войны Е. О. Патон энергично взялся за проектирование мостов по заданию военного ведомства. Была создана оригинальная конструкция разборных мостов, названных мостами Патона и получивших широкое применение для военных целей.

В 1918 г. Евгений Оскарович издает руководство «Восстановление мостов», работает над проектированием новых мостов. В 1920 г. он организовал Киевскую мостоиспытательную станцию НКПС и десять лет руководил ею. За эти годы под руководством и личном участии Е. О. Патона были проверены и испытаны около 150 мостов разных систем в Украине, Беларуси, Поволжье и Казахстане. Е. О. Патон был собран обширный фактический материал, который использовался в учебной и проектной работе.

В 1920 г. белополяки, отступая, взорвали красивейшее сооружение города — цепной мост через Днепр в Киеве. В 1922 г. Е. О. Патон берется за воссоздание моста, вкладывая всю свою неукротимую энергию в это дело. Евгений Оскарович был не только автором оригинального проекта, но и организатором строительства. Благодаря его изобретательности, умению решать самые сложные задачи и упорно преодолевать трудности мост, которому было присвоено имя Евгении Бош, начал функционировать в июне 1925 г.

В 1925–1929 гг. Е. О. Патон интенсивно работал над проектированием новых мостов, участвовал во всесоюзных и международных конкурсах, заслуженно получая высокие оценки и первые премии. В целом около 35 лет научной, инженерной и педагогической деятельности Евгений Оскарович отдал мостостроению, создал проекты 40 мостов, опубликовал свыше 160 научных работ по различным вопросам мостостроения. Многие его ученики стали известными учеными и инженерами, руководителями производств. Избрание Е. О. Патона академиком ВУАН в 1929 г. было вполне заслуженным. Е. О. Патон не без оснований считается основателем школы мостостроения в Украине.

В проектировании железных мостов к тому времени были достигнуты крупные успехи, но процесс их изготовления оставался весьма трудоемким и несовершенным. Это побудило Е. О. Патона к поиску новых технологий. Подготавливая в 1928 г. к переизданию курс «Железные мосты», Евгений Оскарович включает в него раздел по применению сварки в строительстве мостов.

Именно в новом способе соединения металлов — в электросварке — он видит пути коренного улучшения изготовления пролетных строений мостов. И Е. О. Патон принимает смелое и дальновидное решение — заняться сваркой, базируясь на основах металлургии, металловедения, электротехники и физики, т. е. на новых для мостостроителя вопросах.

Начинать пришлось на голом месте: не было ни оборудования, ни знающих людей, ни помещения. Четыре сотрудника и три комнаты в подвале — вот что представляла собой первоначально электросварочная лаборатория ВУАН. Затем на общественных началах был создан Электросварочный комитет при ВУАН, организатором и бессменным председателем которого был Е. О. Патон. На этой скромной базе развернулась интенсивная работа по исследованию прочности сварных конструкций, по пропаганде и

внедрению электросварки в промышленности, на транспорте и в строительстве. Уже на этом этапе Е. О. Патон выдвинул идею создания специализированного научно-исследовательского учреждения для решения всех задач, возникающих на пути развития сварочного производства. В 1933 г. создание такого института было утверждено президиумом ВУАН, а 3 января 1934 г. правительственным постановлением определен официальный статус Института электросварки.

Изначально Е. О. Патон предусмотрел такую организационную структуру института, которая состояла из научно-исследовательских и экспериментально-производственных подразделов, конструкторского бюро и мастерских. Так возник первый в мире специализированный центр по проведению научно-инженерных работ в области сварки, который в отличие от классических академических организаций не ограничивался выполнением сугубо фундаментальных исследований, а с самого начала был нацелен на комплексное решение реальных народнохозяйственных проблем: от углубленного теоретического поиска до применения научно-технических результатов в производстве.

В институте расширялась область научных исследований. В первую очередь всесторонне изучались сварные конструкции, их прочность в различных условиях эксплуатации, напряжения и деформации.

В отличие от большинства исследований в Западной Европе, проводившихся на малых лабораторных образцах (что значительно проще и дешевле), Институт электросварки стремился проводить опыты на сварных узлах, балках, фермах, близких к натурным. Это потребовало сооружения больших испытательных установок, но зато давало более точные и надежные результаты.

Исследования сварных конструкций, проводимые институтом, сразу привлекли большое внимание и получили положительную оценку.

Вскоре появилось второе важное направление исследований — механизация и автоматизация дуговой сварки. Большой жизненный, научный и производственный опыт подсказал Е. О. Патону, что для успеха нового дела надо сделать очень трудный, но необходимый шаг — механизировать и автоматизировать сварку, заменить руку и мастерство электросварщика сварочным автоматом. Эта задача и сегодня остается актуальной.

Развернутые Е. О. Патоном и его учениками целенаправленные фундаментальные

---

исследования стали теоретической основой науки о сварке, превратили ее в мощный источник технического прогресса, что привело к революционным свершениям во многих отраслях производства. Этому же способствовали вышедшие в свет монографии и статьи сотрудников института. Возникает потребность в подготовленных сварщиках и Евгений Оскарович организует в 1935 г. кафедру сварки в Киевском политехническом институте.

В предвоенные годы в Институте электросварки успешно велась разработка надежного оборудования для автоматической сварки открытой дугой. Однако на начальном этапе сварщики-стахановцы, работавшие вручную, обгоняли сложные и дорогие дуговые автоматы и по качеству сварки, и по производительности. Всесторонне изучив проблему и сконцентрировав научный потенциал института, Евгений Оскарович совместно с коллективом института создает новый способ дуговой сварки под флюсом. Это позволило в несколько раз увеличить производительность и резко повысить качество сварных швов. Сварка под флюсом стала промышленно надежным, экономически выгодным технологическим процессом и получила полное признание уже в 1940 г. Для широкого внедрения нового способа нужно было разработать автоматы, флюсы, проволоки и в кратчайший срок организовать их производство.

Евгений Оскарович Патон обратился к правительству за помощью. В конце 1940 г. он был вызван в Москву. В короткий срок было подготовлено, а затем и принято правительством постановление о широком внедрении автоматической сварки под флюсом. Постановление предусматривало внедрение нового способа на 20 крупнейших заводах, организацию производства необходимого оборудования, флюсов и проволоки, расширение Института электросварки. Е. О. Патон был назначен государственным советником и членом Совета машиностроения при СНК СССР. Это постановление стало историческим в развитии советской сварочной техники.

В марте 1941 г. Е. О. Патон был удостоен Сталинской премии первой степени за разработку метода и аппаратуры для скоростной автоматической сварки. Огромная энергия Е. О. Патона и всего коллектива Института электросварки обеспечила успешное выполнение постановления правительства. Внедрение сварки под флюсом принимало широкий размах.

Начавшаяся 22 июня 1941 г. Великая Отечественная война стала грозным испытанием для всего Советского Союза.

Академия наук УССР и большинство ее институтов были эвакуированы в Уфу. Е. О. Патон обратился к эвакуационной комиссии с просьбой перевести Институт электросварки на Урал. Институт переехал в Нижний Тагил на Уралвагонзавод, ставший арсеналом оружия и боеприпасов для фронта. По настоянию Е. О. Патона институт принимал непосредственное участие в организации производства бронекорпусов танков, сосредоточив свои силы на внедрении сварки под флюсом в производство вооружения и боеприпасов.

Деятельность Е. О. Патона в годы войны была особенно плодотворной. В сложных условиях он развернул поисковые и конструкторские работы, главной целью которых было создание высокоскоростной автоматической сварки броневых сталей для бронекорпусов танков. В тяжелых условиях военного времени под его руководством сотрудники института впервые в мире решили сложнейшие научные и технические задачи, связанные с автоматической сваркой брони: создали надежную технологию (В. И. Дятлов, Т. М. Слуцкая, Б. И. Иванов), исследовали процессы, проходящие в мощной сварочной дуге, горящей под флюсом (А. М. Макара, Б. Е. Патон), разработали новые сварочные флюсы.

На заводе в рекордные сроки был организован выпуск танков, и уже в январе 1942 г. первые грозные машины Т-34 вышли из его ворот.

В конце 1942 г. институтом были разработаны автоматы с постоянной скоростью подачи электродной проволоки. Положенный в основу этих автоматов принцип саморегулирования сварочной дуги позволил упростить конструкцию и облегчить изготовление и обслуживание автоматов, расширить возможности их применения. Кроме танковых заводов, Институт электросварки внедрял автоматическую сварку на других оборонных предприятиях. Впервые в мире с помощью скоростной автоматической сварки под флюсом было организовано поточное производство фугасных авиабомб, реактивных снарядов для катюш, а также другого вооружения и боеприпасов для нужд фронта. К концу 1944 г. автоматическая сварка под флюсом применялась уже на 52 заводах.

За успешное внедрение автоматической сварки под флюсом в производство Евгений Оскарович и ряд сотрудников института были награждены орденами СССР.

2 марта 1943 г. Е. О. Патону, первому из украинских академиков, присваивается звание Героя Социалистического Труда за выдающиеся достижения по обеспечению ускоренного производства танков.

Летом 1944 г. Евгений Оскарович возвращается в родной Киев, освобожденный Советской Армией от фашистских оккупантов.

С этого времени началась вторая жизнь Института электросварки. Ему было предоставлено здание по улице Горького.

Военные годы закалили и укрепили коллектив института, сохранив его высокую работоспособность и увлеченность делом. Используя разработки уральского периода, институт до конца 1945 г. внедрил автоматическую сварку под флюсом на 12 больших предприятиях. В этом же году институту было присвоено имя его основателя и руководителя.

Под руководством Е. О. Патона институт быстро растет и развивается, разворачиваются обширные научные исследования, осуществляются многочисленные разработки, публикуются сборники и монографии по различным проблемам сварки.

Круг вопросов, которыми занимается в эти годы Евгений Оскарович, непрерывно расширяется. К работе по руководству институтом присоединяются все новые общественные и государственные обязанности. Евгений Оскарович избирается вице-президентом Академии наук УССР и отдает много сил ее деятельности. Он дважды избирается депутатом Верховного Совета СССР. Е. О. Патон принимает активное участие в решении государственных дел, проявляет много заботы о своих избирателях. Авторитет и известность Евгения Оскаровича и руководимого им института непрерывно расширяются не только в СССР, но и за рубежом. Институт электросварки по праву занял ведущее положение в мире среди научных учреждений в области сварки.

Ни одна страна, даже такая богатая и развитая, как США, не располагает подобным научно-техническим центром.

Особенно близкой темой для Евгения Оскаровича оставались сварные мосты. Несмотря на огромную нагрузку, он не переставал заниматься ими, разрабатывая и реализуя идеи, вынашиваемые многие годы.

Венцом многолетних трудов Евгения Оскаровича Патона явилось сооружение цельносварного автодорожного моста через Днепр в Киеве вместо разрушенного войной моста им. Евгению Бош. Всего лишь около трех месяцев жизни не хватило Е. О. Патону, чтобы увидеть осуществление своей мечты. Торжественное открытие моста, которому было присвоено имя Е. О. Патона, состоялось 5 ноября 1953 г. Мост представляет собой сооружение с пролетным строением большой длины, причем все его элементы, сваренные автоматами на заводе, соединены на монтаже с применением автоматической сварки под флюсом. Мост им. Е. О. Патона и ныне остается одним из крупнейших в мире цельносварных мостов. В 2003 г. торжественно отмечено пятидесятилетие моста.

Евгений Оскарович Патон прожил долгую жизнь, наполненную непрерывным и неустанным творчеством. Он отличался редким трудолюбием и необычайной энергией. Большая часть прожитых им дней была занята трудом по 12–14 часов.

Вклад Е. О. Патона в научно-технический прогресс, подготовку инженерных кадров, создание научной школы отмечен орденами Российской империи и орденами СССР, а именно орденами Станислава, Анны, двумя орденами Ленина, Золотой Звездой Героя Социалистического Труда, двумя орденами Трудового Красного Знамени, Отечественной войны I степени и Красной Звезды, ему было присвоено звание заслуженного деятеля науки.

Редколлегия журнала

## АБРАЗИВНЫЙ ОТРЕЗНОЙ СТАНОК МЕТАСИТ А350

Известная в Украине компания НПФ «Диагностические приборы» расширила свою деятельность за счет поставок оборудования для металлографического и спектрального анализа турецкой компании МЕТКОН, производящей полный набор металлографического оборудования и вспомогательных материа-



лов высокого качества, в том числе: абразивные отрезные станки, прецизионные отрезные станки МЕТАСИТ А350, металлографические прессы для запрессовки образцов, шлифовально-полировальное ручное и автоматизированное оборудование, металлографические микроскопы, микротвердомеры, станки для изготовления образцов для спектральных исследований, расходные материалы для пробоподготовки и т. п.

Компания МЕТКОН хорошо зарекомендовала себя в России и благодаря демократичным ценам заняла достойное место среди ведущих производителей оборудования для металлографического анализа: Buehler, Struers, Leco.

НПФ «Диагностические приборы» поставляет полный спектр оборудования и материалов для технического диагностирования

– оборудование и материалы для неразрушающего контроля и толщинометрии, оборудование для механических испытаний и измерения твердости, оборудование и материалы для металлографических исследований.

## МОБИЛЬНАЯ ШИРОГРАФИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА

В ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ разработана мобильная широкографическая установка, позволяющая проводить исследования в реальном масштабе времени на объектах сложной геометрической формы и любых размеров.

Применение установки возможно в промышленности для:

- ♦ измерения и анализа деформаций объекта;
- ♦ неразрушающего контроля качества конструкций, изготовленных из металлических, полимерных и композиционных материалов;
- ♦ оптимизации узлов машин и элементов конструкций.

*Основные преимущества :* оперативность контроля; бесконтактность; высокая чувствительность; возможность получения информации о деформации контролируемого объекта; отсутствие требований по виброзащите и специальной подготовке поверхности.

## ТРАССОИСКАТЕЛЬ ТК-1 (ПОДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ И КАБЕЛЕЙ)

В Ивано-Франковском национальном техническом университете нефти и газа разработан трассоискатель **ТК-1**, предназначенный для нахождения бесконтактным и контактным способами металлических трубопроводов и электрических кабелей, которые строятся или эксплуатируются, уложенных под разными дорожными покрытиями, без раскрытия грунта, для определения бесконтактным способом местоположения и глуби-



ны их залегания.

Трассоискатель ТК-1 имеет высшую по сравнению с аналогичными устройствами помехозащищенность и селективность.

## КТУ-1

Ультразвуковой коррозиметр-толщиномер предназначен для определения степени коррозионного повреждения поверхности с одновременным измерением остаточной толщины материала изделия с плоской и цилиндрической поверхностью.



## ВИБРАЦИОННАЯ ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ВАС-1

Учеными Физико-механического института им. Г. В. Карпенко НАН Украины разработана система, предназначенная для вибродиагностики вращающихся механизмов больших стационарных агрегатов, в частности, подшипников опор турбогенераторов теплоэлектростанций, редукторов порталных кранов, компрессоров газоперекачивающих станций и т.п.

Система позволяет одновременно измерять вибрационные колебания в трех координатах (осевой, горизонтальной и вертикальной); минимизирует влияние сигналов от возможных мощных помех с помощью парафазных линий приема-передачи; обнаруживает дефекты вращающихся механизмов на ранних стадиях зарождения путем анали-



за детерминированной и случайной составляющих вибрационного сигнала; использует методы статистического оценивания вероятностных характеристик вибрационных сигналов на основе теории периодически нестационарных процессов, что позволяет определять глубину модуляций, присутствующих в сигнале, и оценивать остаточный ресурс механизмов продолжительной эксплуатации.

### ПОРТАТИВНАЯ ЦИФРОВАЯ РЕНТГЕНОТЕЛЕВИЗИОННАЯ СИСТЕМА

В ИЭС им. Е.О.Патона НАН Украины в отделе неразрушающего контроля разработана портативная цифровая рентгенотелевизионная система, предназначенная для рентгенотелевизионного контроля сварных соединений металлоконструкций.



#### Преимущества системы:

- ♦ высококонтрастный рентгенооптический преобразователь;

- ♦ высокая радиационная чувствительность при низком шуме;
- ♦ высокое разрешение и стабильность изображения; низкая инерционность;
- ♦ возможность контроля движущихся объектов;
- ♦ высокоэффективная цифровая обработка изображения;
- ♦ низкая дозовая нагрузка на окружающую среду;
- ♦ широкие возможности системы архивирования изображений.

### УСТАНОВКА НК 321

Разработанная ОКТБ ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ установка предназначена для АУЗК кольцевых сварных соединений трубопроводов ДУ 850 ГЦТ реактора ВВЭР-1000 диаметром 990 мм с толщиной стенки 70 мм, а также для обнаружения в кольцевом сварном шве и околошовной зоне несплошностей типа пор, шлаковых включений, непроваров, трещин и определения их условных размеров, расположения с выдачей документа контроля в виде протокола.



### УСТАНОВКА НК 362М

Предназначена для автоматизированного ультразвукового контроля концевых участков труб диаметром 508–1420 мм с толщиной стенки 7–50 мм.

#### Установка обеспечивает:

- ♦ прозвучивание по всему периметру обоих концов труб по всей толщине стенки, выявление дефектов типа расслоений на ширине 60 мм от торца и продольно ориентированных дефектов типа



трещин на ширине 30 мм от торца и т.д.

Многоканальный ультразвуковой дефектоскоп выполнен на базе плат «Socomate».

### СЕМЕЙСТВО УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПОРТАТИВНЫХ ТОЛЩИНОМЕРОВ ТУЗ-1, ТУЗ-2, ТУЗ-5

НПФ фирмой «Ультраконсервис» разработаны портативные ручные ультразвуковые толщиномеры, предназначенные для оперативного измерения толщины изделий из различных материалов и скорости распространения ультразвуковых колебаний при одностороннем доступе к ним.

Толщиномеры могут применяться в различных отраслях промышленности для измерения толщины стенок емкостей, труб, корпусных деталей, листов и т. п., в том числе с корродированными поверхностями, при производстве и эксплуатации.



#### Преимущества приборов:

малые габаритные размеры и масса; широкий диапазон контролируемых толщин; большая продолжительность непрерывной работы; автоматическая калибровка «0» датчика.



УДК 621.19.44

## КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ПОВРЕЖДЕННОСТИ И ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА МЕТАЛЛОВ С ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАРАБОТКОЙ

С. А. НЕДОСЕКА, А. Я. НЕДОСЕКА

*Обобщены результаты испытания различных материалов с целью получения аналитической зависимости для расчета остаточного ресурса металла трубопроводов с различной эксплуатационной наработкой. Найденная зависимость получена при помощи обобщенного критерия  $\Delta W_n$ , основанного на отношении структурно-чувствительных параметров, характеризующих изменение работоспособности материала конструкции вследствие накопления эксплуатационных повреждений.*

*Results of testing various materials to derive an analytical dependence for calculation of residual life of pipeline metal with different operating lives are generalized. The derived dependence was obtained using generalized  $\Delta W_n$  criterion, based on the relationship of structurally-sensitive parameters characterizing the change of structure material performance as a result of operating damage accumulation.*

В процессе длительной эксплуатации материалы, как правило, претерпевают изменение ряда физических и механических свойств. Если речь идет о промышленных конструкциях, то характерным является влияние в процессе эксплуатации на эти свойства множества различных факторов, природа которых, а тем более количественные показатели, чаще всего не полностью известны. К указанным факторам можно отнести режимы и историю нагружения, сезонные изменения свойств материала, коррозию, внештатные перегрузки и ряд других. Результатом действия упомянутых факторов является некоторое, отличное от первоначального, состояние материала, которое далее будем называть поврежденным.

В качестве примеров изменения материала вследствие накопленных в процессе эксплуатации повреждений на рис. 1 показан элемент трубы разрушенного участка газопровода, проработавшего более 35 лет под землей, на рис. 2 представлены образцы материалов труб газопроводов, прошедшие испытания на ударную вязкость. Исследуя изменение состояния материала при помощи различных инструментальных методов, получают некоторые числовые характеристики, которым следует дать определенное объяснение. Одним из возможных подходов для такого объяснения может быть трактовка указанных числовых характеристик как формального показателя интегральной поврежденности материала. Исследования кинетики накопления повреждений в условиях равновесного деформирования, выполненные А. А. Лебедевым и Н. Г. Чаусовым [13], показывают, что

процесс разрушения начинается с образования пор, появившихся при слиянии дислокаций на границах зерен.\* На рис. 3 поэтапно представлен



Рис. 1. Элемент трубы после длительной эксплуатации (а) и поверхность разрушения (б)

\* Данные результаты подтверждаются работами J. R. Rice, D. M. Tracey [10], А. Герсоном [11] и др. [17–25].



Рис. 2. Образцы после испытаний на ударную вязкость в зависимости от времени наработки (стрелка — деградация материала с течением времени)

процесс накопления повреждений и разрушения стали 12Х2МФА при статическом растяжении [13]. Показано, что с увеличением деформации количество пор растет. В конечном счете, в результате их слияния образуется магистральная трещина, приводящая к разрушению.

Проведенный анализ состояния материала разрушившихся изделий, комплексное исследование кинетики накопления повреждений при разрушении образцов из исходного материала и материала, находившегося длительное время в эксплуатации, позволили предложить методику прогнозирования разрушающих нагрузок и остаточного ресурса этих материалов на основе оценки постепенного накопления повреждений в процессе их работы под нагрузкой. В случае использования

единого способа оценки поврежденности при обработке результатов, полученных различными методами, появляется возможность выразить поврежденность в одинаковых безразмерных величинах и сопоставить их.

Вопрос оценки остаточного ресурса для материалов с эксплуатационной наработкой является весьма актуальным. Для материалов, подвергающихся циклическому нагружению с известными параметрами цикла, расчет остаточного ресурса не представляет сложности и широко представлен в литературе [2]. Для прочих материалов, особенно подвергнувшихся действию множества трудно учитываемых факторов в процессе эксплуатации, требуется определение параметров, которые имеют устойчивую закономерность изменения во времени и могут служить для определения их остаточного ресурса. Одним из таких параметров может служить интегральный показатель поврежденности материала, определенный по результатам испытаний образцов с известной эксплуатационной наработкой.

В ранее опубликованных работах [3, 4] был предложен критерий оценки поврежденности материалов по результатам АЭ сканирования. АЭ сканирование представляет собой интегральный метод оценки состояния материала, во многом подобный УЗК, отличающийся тем, что для сканирования используют АЭ аппаратуру с широкополосными датчиками, а анализ сигналов на выходе проводят аналогично анализу АЭ при стандартных АЭ испытаниях. Исходные данные были получены на образцах из сталей 17ГС, 17Г1С, стали 20, 09Г2С и ее чешского аналога с длительной наработкой,

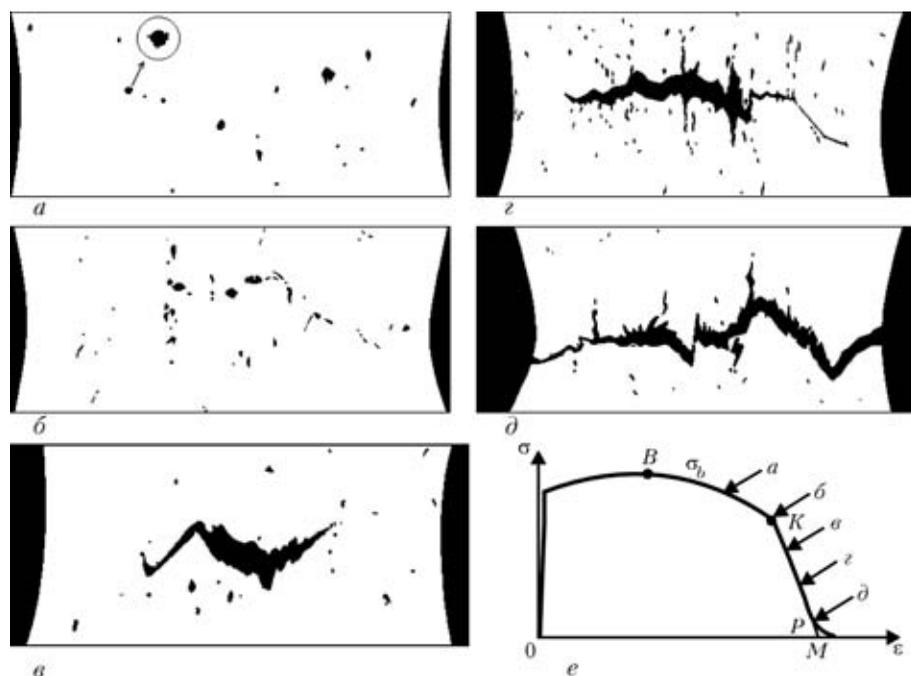


Рис. 3. Накопление повреждений в стали 15Х2МФА (X20) на различных стадиях деформирования образца при растяжении: а – д — стадии деформирования на ниспадающем участке кривой  $\sigma$ - $\epsilon$  (e) [13]



представляющих трубопроводы из различных регионов Украины, и на образцах из этих же материалов в исходном состоянии — из аварийного запаса. Критерий оценки опасности накопленных в металле конструкций повреждений представлен в виде  $\Delta W_{cp} = 1 - v_{повр}/v_{исх}$ , где в качестве акустического параметра, позволяющего оценить степень поврежденности материала, служит характеристика, имеющая смысл скорости нарастания сигнала до максимума  $v = A/R$ , где  $A$  — амплитуда выходного сигнала;  $R$  — время его нарастания до максимума для исходного («исх») и поврежденного («повр») материала. Показано, что если скорость  $v$  для наработанного материала меньше, чем для исходного, то в материале возникли необратимые повреждения, связанные с остаточным изменением объема. Причем, если подобные соотношения наблюдаются по трем направлениям сканирования, то это служит индикатором наиболее опасного состояния материала, поскольку в нем интенсивно развивается объемная поврежденность.

Данные, характеризующие механические свойства металла исследованных труб в исходном состоянии, свидетельствуют об их сравнительно небольшом различии, что объясняется прежде всего единой природой и близким химическим составом сталей. Это дало основание формально рассматривать экспериментальные данные, полученные на разных трубопроводах после различной длительности их эксплуатации, как результаты исследования состояния металла трубы из низколегированной стали в составе некоего виртуального газопровода на разных стадиях эксплуатации.

Предложенный подход требует наличия относительно одинаковых свойств металла труб в исходном состоянии, относительно одинаковых условий механического нагружения труб и относительно одинаковых параметров температурно-химических воздействий. Такие условия для реальных трубопроводов, в отличие от рассматриваемого виртуального, в определенной степе-

ни могут не соблюдаться, что вполне объясняет отклонения экспериментальных результатов от их среднестатистических значений. Несмотря на перечисленные ограничения, такой подход позволяет количественно описать процесс накопления повреждений в металле труб.

Сопоставление результатов определения поврежденности методами АЭ сканирования и рассеяния твердости [4, 5] показало их хорошую корреляцию. Так, для наружных слоев материала труб коэффициент корреляции кривых поврежденности составил 89,86 %, а для внутренних — 90,72 %.

Полученные результаты позволили предположить, что и данные других инструментальных методов могут быть успешно использованы при определении поврежденности исследованных материалов. Учитывая, что для этих материалов были проведены также АЭ испытания при статическом нагружении, определение остаточного объема пустот взвешиванием в жидкости и измерение ударной вязкости, в данной работе предпринята попытка обобщить полученные данные путем использования обобщенного формального критерия поврежденности.

Формальный критерий поврежденности сформулируем как  $\Delta W_{п} = 1 - \Pi_{повр}/\Pi_{исх}$ , где  $\Pi$  — параметр, отражающий изменение некоторого свойства материала в процессе накопления повреждений.

Для результатов АЭ испытаний (рис. 4) характерным было отличие АЭ картины как для испытаний образцов из различных материалов, так и для испытаний образцов, вырезанных из соседних участков, в связи с чем при расчете  $\Delta W_{АЭ}$  для каждой группы испытанных материалов (три образца в исходном состоянии и три после эксплуатационной наработки) использовали наиболее структурно-чувствительный параметр  $\Pi_{АЭ}$ , представляющий собой одну из трех линейных комбинаций:  $\Sigma A \nabla(\ln K)$ ;  $\Sigma A \nabla(K)$ ;  $K \nabla(K)$ . Здесь  $\Sigma A$  — сумма амплитуд АЭ событий;  $K$  — коэф-

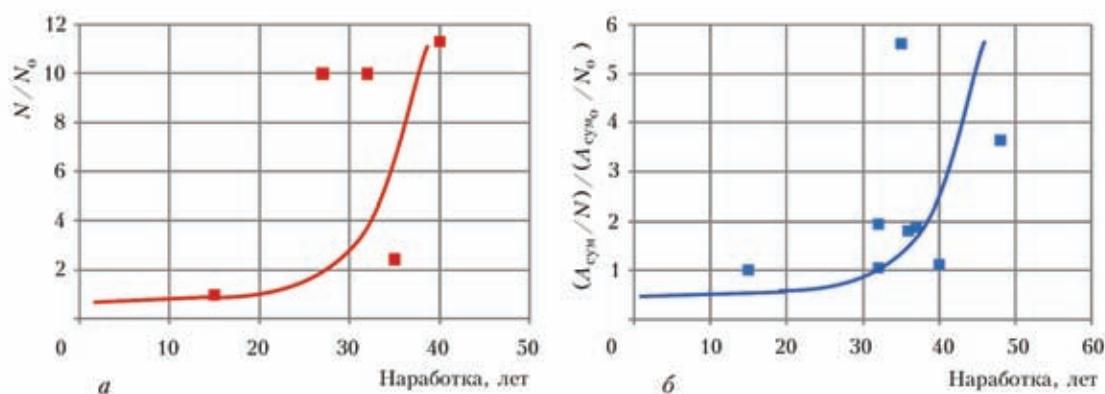


Рис. 4. Изменение параметров АЭ вследствие наработки: а — число событий АЭ ( $N$ ) в материалах с множественными рассеянными повреждениями; б — отношения суммы амплитуд АЭ к числу событий ( $A_{сум}/N$ ) в охрупчивающихся материалах

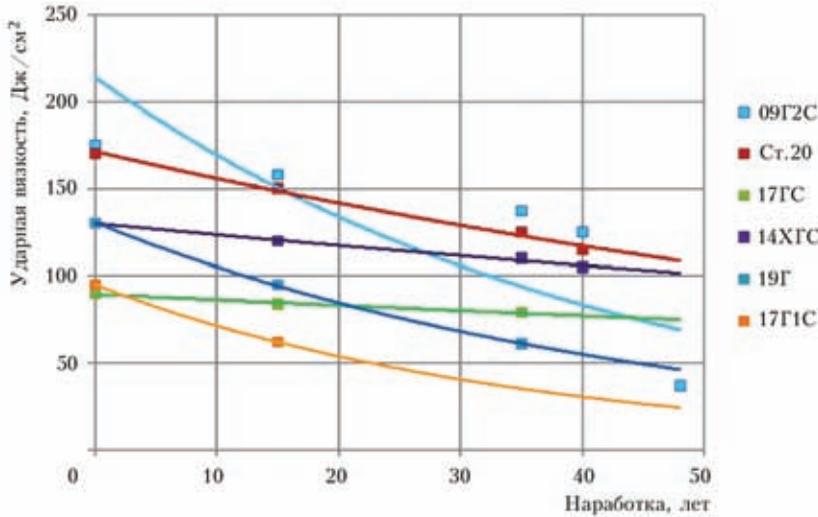


Рис. 5. Изменение ударной вязкости исследованных материалов вследствие наработки

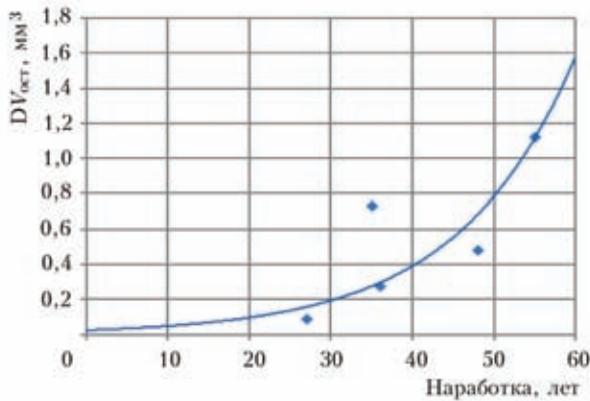


Рис. 6. Изменение остаточного объема вследствие наработки

коэффициент коррекции результатов расчета по числу событий  $N$  ( $K = aN^m$ ). Величины  $a$  и  $m$  представляют собой константы материала, определяемые экспериментально при испытании образцов. Расчет поврежденности  $\Delta W_{АЭ}$  выполняли для трех перечисленных параметров по приведенным формулам, затем выбирали наибольшее значение.

При оценке  $\Delta W_{ув}$  поврежденности по изменению ударной вязкости (рис. 5) в качестве исходного значения принимали ее величину для материала в состоянии поставки, в качестве поврежденного — значение после эксплуатационной наработки.

Для результатов взвешивания малых проб в жидкости (рис. 6) [3, 4] критерий  $\Delta W_p$  был сформулирован как  $\Delta W_p = 1 - (V_{ост.макс} - V_{ост})/V_{ост.макс}$ , где  $V_{ост}$  — текущий объем вновь образовавшихся пустот;  $V_{ост.макс}$  — объем пустот в максимально поврежденном материале (определен экспериментально на пробах материала из разрушенного трубопровода после аварии). К сожалению, измере-

ния ударной вязкости и взвешивание проб в жидкости выполнено не для всех испытанных материалов, поэтому наиболее полно далее представлены результаты оценки поврежденности по данным АЭ испытаний и АЭ сканирования.

Сведем результаты оценки поврежденности по данным различных методов в таблицу, куда для полноты поместим также данные, полученные в Институте проблем прочности НАН Украины по расчету поврежденности  $\Delta W_{LM}$  методом LM-твердости. Дублирующие данные по годам в табл. 1 относятся к различным трубопроводам с одинаковой наработкой.

Очевидно, что приведенные в табл. 1 данные имеют достаточно большой статистический разброс. Тем не менее, если зависимость поврежденности от наработки, полученную каждым методом, аппроксимировать экспоненциальной зависимостью и построить соответствующую линию тренда, то полученные в результате кривые не только имеют общую тенденцию изменения, но и расположены достаточно близко (рис. 7).

Следует отметить, что наилучшее совпадение кривой  $\Delta W_p$  с остальными может быть объяснено малым набором имеющихся статистических данных. Однако сравнение параметра  $\Delta W_p$  с данными других методов представляется оправданным по той причине, что он напрямую отражает объем накопленных в материале повреждений и связан с деформацией

Таблица 1. Поврежденность исследованных материалов, определенная различными методами

Наработка, лет	$\Delta W_{АЭ}$	$\Delta W_{СКАН}$	$\Delta W_{LM}$	$\Delta W_{ув}$	$\Delta W_p$
15	0,11	0,24	0,23	0,16	—
27	0,11	0,41	0,35	—	0,05
32	0,12	0,05	0,41	—	—
32	0,48	0,51	0,41	—	—
32	0,56	0,6	0,41	—	—
32	0,71	0,73	0,41	—	—
33	0,48	0,21	0,43	—	—
35	0,59	0,41	0,46	0,26	0,17
35	0,82	0,89	0,46	0,53	0,46
40	0,71	0,68	0,54	0,28	—
41	0,91	0,73	0,55	0,32	—
48	0,31	0,52	0,75	0,56	0,3
48	0,72	0,64	0,75	0,79	—
55	0,60	0,31	0,96	—	0,69

\* В прямоугольных декартовых координатах линейный оператор  $\nabla$  определяется формулой  $\nabla = \frac{\partial}{\partial x}i + \frac{\partial}{\partial y}j + \frac{\partial}{\partial z}k$ .

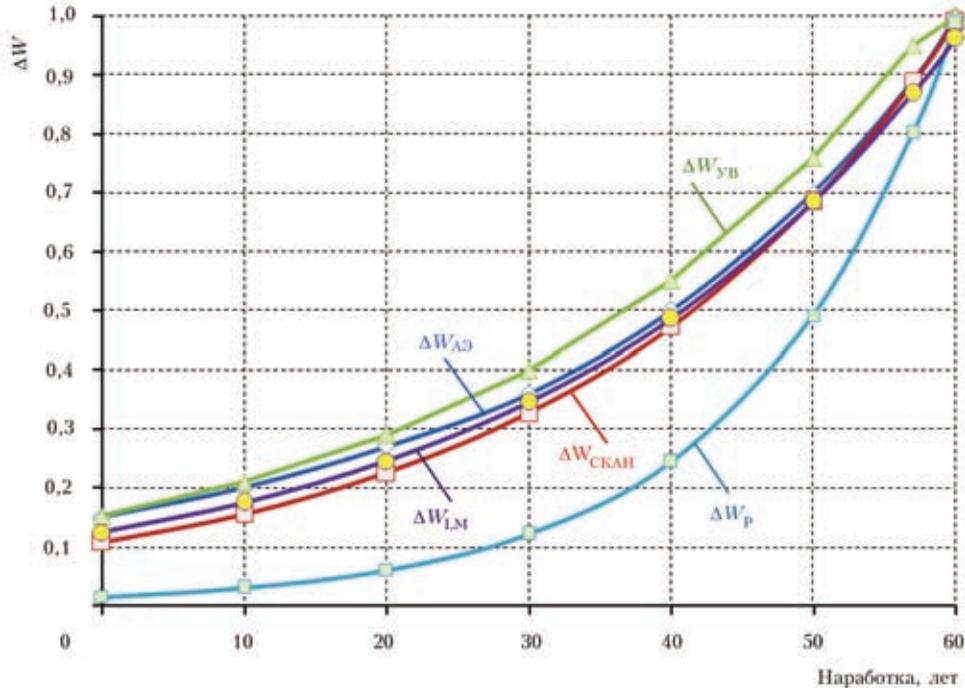


Рис. 7. Кривые зависимости поврежденности от эксплуатационной наработки, полученные различными методами (в обозначениях критерия  $\Delta W$ : АЭ — по данным акустической эмиссии; УВ — ударной вязкости; СКАН — сканирования; Р — взвешивания малых проб; LM — специального критерия твердости)

разрыхления [4]. Хотя при дальнейшей обработке и обобщении полученных результатов поврежденность, определенную путем взвешивания проб в жидкости, не использовали, следует отметить, что коэффициент корреляции  $\Delta W_{\text{Р}}$  со среднеарифметическим значением поврежденности  $\Delta W_{\text{ср}}$ , определенной остальными методами, составляет 0,98.

Ранее было показано [3, 4, 7–9], что изменения акустических сигналов при прохождении через материал с накопленными повреждениями коррелируют с объемом и расположением в нем мелких пор. Учитывая корреляцию между значением поврежденности по данным различных методов, а также то, что для исследованных сталей характерен вязкий механизм разрушения, можно предположить, что изменения всех рассмотренных в работе структурно-чувствительных параметров исследованных материалов связаны именно с процессом разрыхления, что соответствует также известным теоретическим разработкам [10, 11].

Среднеарифметическое значение поврежденности  $\Delta W_{\text{ср}}$  для четырех остальных методов может быть описано уравнением  $\Delta W_{\text{ср}} = ae^{bt}$ , где  $t$  — срок эксплуатационной наработки;  $a = 0,1352$ ;  $b = 0,0333$  (рис. 8).

Параметром поврежденности  $\Delta W_{\text{ср}}$  можно воспользоваться для определения остаточного ресурса испытанных материалов, причем по данным любого из четырех инструментальных методов. Для этого построим номограмму в координатах «поврежденность—остаточный ресурс», воспользовавшись уравнением кривой

$\Delta W_{\text{ср}}$  и учитывая, что в точке  $\Delta W_{\text{ср}} = 1$  остаточный ресурс должен принимать значение 0.

Расположив данные на номограмме и экстраполировав ее до значения поврежденности  $\Delta W_{\text{ср}} = 0$ , опишем их логарифмической зависимостью. Уравнение соответствующей линии тренда примет вид  $t_{\text{ост}} = n \ln(\Delta W_{\text{ср}}) + m$ , где  $t_{\text{ост}}$  — остаточный ресурс;  $n = -30,03$ ;  $m = -0,115$  (рис. 9). Полученное уравнение может быть использовано для определения остаточного ресурса исследованных материалов по известной поврежденности.

Естественно, полученная номограмма построена на основе обработки и осреднения большого массива данных, имеющих статистический разброс. В связи с этим остаточный ресурс также

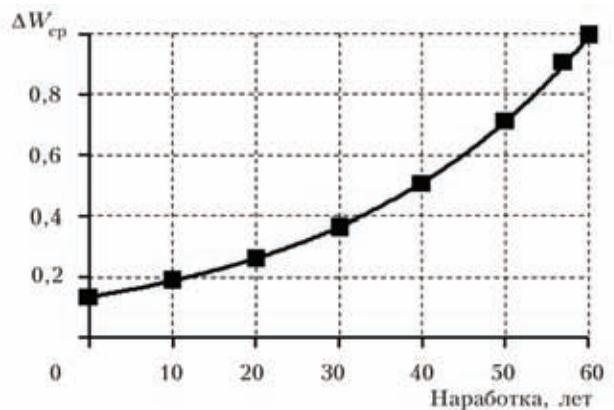


Рис. 8. Осредненная кривая поврежденности  $\Delta W_{\text{ср}}$  по данным четырех методов

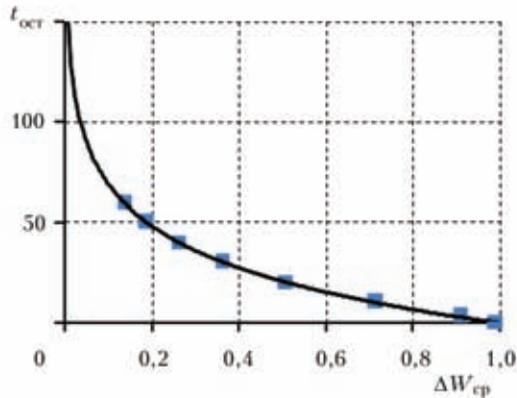


Рис. 9. Номограмма для определения остаточного ресурса по известной поврежденности

будет определен с некоторой погрешностью. Тем не менее, предложенная методика позволяет обобщать результаты экспериментальных данных, полученных различными методами. Для того, чтобы убедиться в ее работоспособности, сравним остаточный ресурс, полученный таким образом для результатов АЭ испытаний, АЭ сканирования, измерения ударной вязкости и рассеяния твердости.

Построим диаграммы, представляющие сравнительный анализ остаточного ресурса для некоторых пар наборов экспериментальных данных.

К каждому набору данных добавим дополнительный элемент, соответствующий нулевой поврежденности и «бесконечному» остаточному ресурсу. Учитывая, что номограмма описывается логарифмической зависимостью, для которой подстановка нулевого аргумента недопустима, вместо него использовали очень малое значение

$\Delta W_{ср} = 0,0001$ . При этом максимальный остаточный ресурс, соответствующий нулевой поврежденности, составляет 276,4 года. Реальные экспериментальные данные, на основе которых рассчитывали остаточный ресурс, имеют ненулевую поврежденность, в связи с чем на представленных диаграммах ограничили интервал времени от 0 до 100 лет.

С учетом изложенного выше, на диаграммы были нанесены также линии тренда, имеющие вид прямых, описываемых уравнениями вида  $t_1 = kt_2$ , где  $t_1, t_2$  — сравниваемые значения остаточного ресурса, полученные методами 1 и 2 соответственно. Для наиболее показательных сравниваемых наборов данных — остаточного ресурса, определенного по результатам АЭ испытаний, АЭ сканирования и измерений ударной вязкости, уравнения тренда имеют следующий вид:  $t_{скан} = 0,97t_{АЭ}$ ;  $t_{ув} = 0,99t_{АЭ}$ ;  $t_{ув} = 1,016t_{скан}$ .

Приведенные данные иллюстрируются диаграммами на рис. 10–12. Видно, что, несмотря на имеющийся разброс результатов конкретных отдельных испытаний, общие количественные и качественные закономерности присутствуют во всех рассмотренных случаях. В то же время следует отметить, что наилучшие результаты показали данные, полученные с помощью АЭ и АЭ сканирования.

С помощью предложенной методики можно уточнить результаты ранее проведенной оценки остаточного ресурса исследуемых материалов. Упомянутая оценка также базировалась на изменении некоторых характеристик поврежденного материала по сравнению с исходными. Однако поскольку имелись результаты

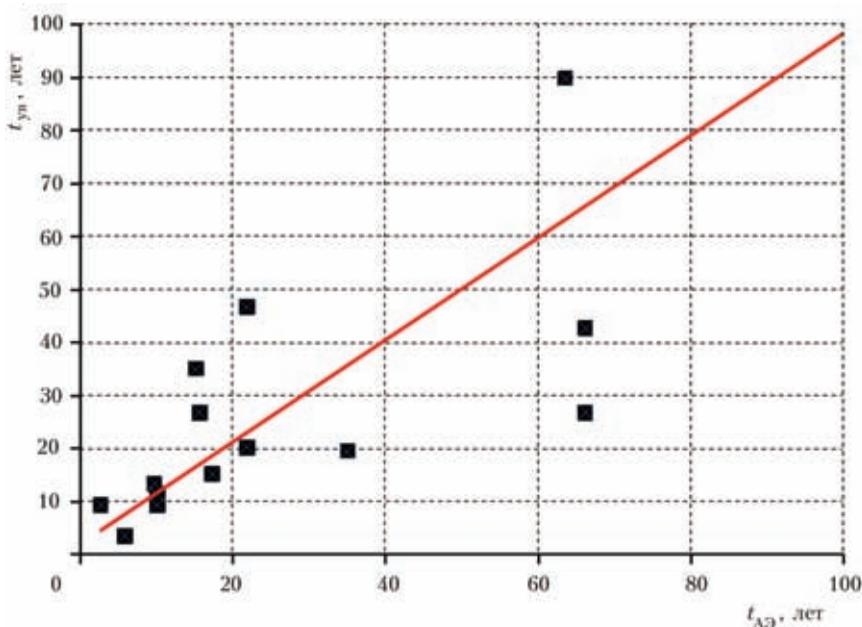


Рис. 10. Сопоставление остаточного ресурса, определенного по номограмме на основе данных АЭ и АЭ сканирования

испытаний каждого из материалов только в двух состояниях — неповрежденного и с определенным сроком наработки — для определения времени исчерпания несущей способности и соответствующего остаточного ресурса строили прямую линию, точка пересечения которой с осью времени определяла момент предельного повреждения материала. Надо полагать, что такая зависимость должна быть более сложной и, как показали проведенные исследования и расчеты, наиболее правдоподобно ее описывает экспоненциальная кривая.

В частности, в работе [7] величина остаточного ресурса материала с наработкой 48 лет, определенного авторами по та-

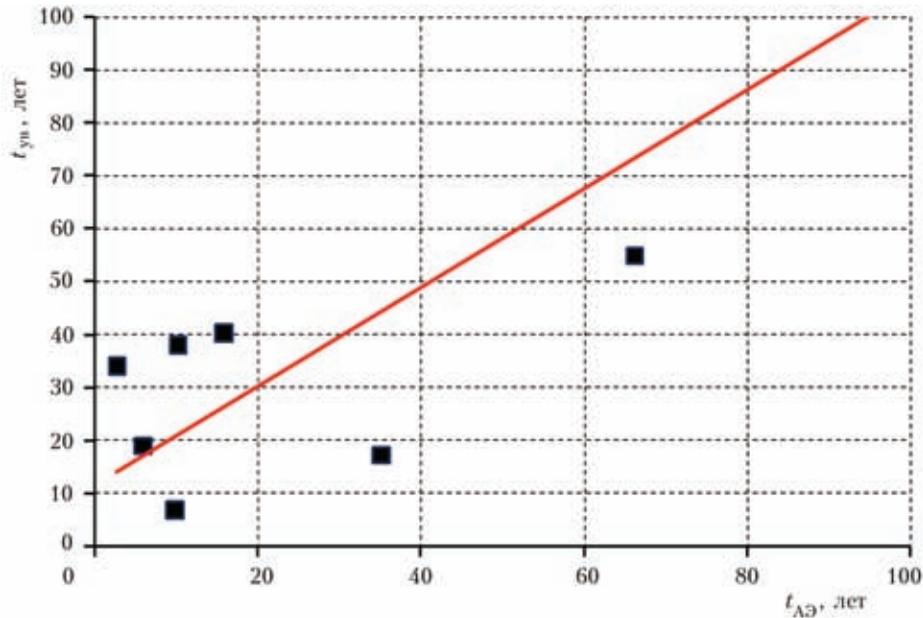


Рис. 11. Сопоставление остаточного ресурса, определенного по номограмме на основе данных АЭ и ударной вязкости

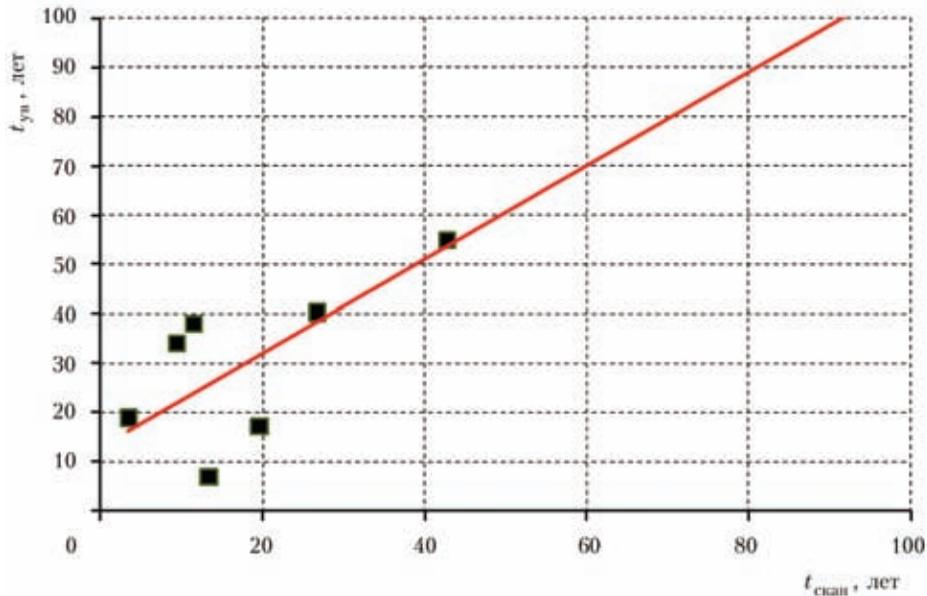


Рис. 12. Сопоставление остаточного ресурса, определенного по номограмме на основе данных АЭ сканирования и ударной вязкости

кой методике, составила по данным АЭ два года. В качестве структурно-чувствительной АЭ характеристики в данном исследовании было использовано число событий АЭ. Проведем сравнительный анализ полученных данных, рассчитав остаточный ресурс при помощи уравнения, представленного номограммой на рис. 9.

Поврежденность материала:

$$\Delta W_{АЭ} = 1 - N_{повр}/N_{исх} = 1 - 64/139 = 0,94.$$

Остаточный ресурс, определенный при помощи предложенной номограммы, составляет  $t_{ост} = -30,03 \ln(0,94) - 0,115 = 1,74$  года.

Высокая поврежденность материала подтверждается и АЭ сканированием. При первоначаль-

ных значениях амплитуды сканирующего сигнала 499 мВ и длительности 150 мкс в поврежденном материале эти параметры изменились до 135 мВ и 420 мкс соответственно. Поврежденность материала  $\Delta W_{скан}$  составляет при этом 0,77, остаточный ресурс  $t_{ост} = -30,03 \ln(0,77) - 0,115 = 7,7$  года.

Близки результаты и при определении поврежденности методом ударной вязкости. Для основного металла ударная вязкость составляет 37,5 Дж/см<sup>2</sup>. Поврежденность  $\Delta W_{скан} = 0,86$ , остаточный ресурс, определенный при помощи предложенной номограммы,  $t_{ост} = 4,4$  года.

Учитывая, что исследованные образцы из стали 09Г2С были вырезаны из участка трубопро-



вода, на котором возникла трещина и произошла авария, рассчитанный ресурс материала вполне соответствует действительности. Следует отметить, что погрешность измерений, проведенных различными методами, может отличаться, и для ее устранения необходим больший объем экспериментальных данных. Тем не менее, использование номограммы для оценки остаточного ресурса по известной поврежденности дает широкие возможности, например, при сравнительной оценке остаточного ресурса различных материалов. Естественно, полученная логарифмическая зависимость справедлива только для проведенной серии экспериментов, и дополнительные исследования могут внести в нее определенные коррективы. Тем не менее, в настоящей работе предложен и формализован обобщенный подход к оценке состояния материала на основании одинаковой трактовки изменений состояния материала в процессе эксплуатации, независимо от того, каким методом эти изменения были зарегистрированы.

## Выводы

1. Количественная оценка поврежденности исследованных материалов труб, проведенная по данным пяти различных методов, показывает, что кривая накопления повреждений может быть описана функциональной зависимостью (рис. 8).

2. Используя полученное уравнение для определения  $\Delta W_{\text{ср}}$ , построена номограмма для определения остаточного ресурса (рис. 9).

3. Представленный в работе формальный критерий поврежденности позволяет сопоставить полученные разными методами результаты оценки накопленных при эксплуатации повреждений.

4. Полученные функциональные зависимости справедливы для исследованных материалов в определенных условиях эксплуатации. Для определения их пригодности к оценке других материалов или при других условиях требуются дополнительные исследования.

1. *About experience of Ukraine in the solution of problems of safety control exploitation of welded structures and preservation of an environment* / В. Е. Патон, А. Я. Недосека, Л. М. Лобанов, С. А. Недосека // The Report № IIW DOC XI-735-00 on commission XI «Intern. Inst. of Welding», July 9-14, 2000, Florence, Italy.
2. *Соппротивление* материалов деформированию и разрушению. Справ. пос. / В. Т. Трошенко, А. Я. Красовский, В. В. Покровский и др. — Киев: Наук. думка, 1993.
3. *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.
4. *Модель* накопления повреждений в металлических материалах при статическом растяжении / А. А. Лебедев, Н.

- Г. Чаусов, С. А. Недосека, И. О. Богинич // Пробл. прочности. — 1995. — № 7. — С. 31-40.
5. *Контроль* текущего состояния металла труб действующих газопроводов. Метод исследования и результаты / А. А. Лебедев, Н. Р. Музыка, Н. Л. Волчек, С. А. Недосека // Там же. — 2003. — № 2. — С. 29-36.
6. *Оценка* состояния металла труб после длительной эксплуатации в системе магистральных газопроводов / А. А. Лебедев, С. А. Недосека, Н. Р. Музыка, Н. Л. Волчек // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2003. — № 2. — С. 3-8.
7. *Недосека С. А.* Причины возникновения повреждений и остаточный ресурс материала аварийного участка трубопровода Дашава-Киев // Там же. — 1998. — № 1. — С. 38-50.
8. *Комплексная* оценка поврежденности материала при пластическом деформировании / А. А. Лебедев, Н. Г. Чаусов, И. О. Богинич, С. А. Недосека // Пробл. прочности. — 1996. — № 5. — С. 23-30.
9. *Недосека А. Я., Недосека С. А.* Акустическая эмиссия и ресурс конструкций // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2008. — № 2. — С. 3-11.
10. *Rice J. R., Tracey D. M.* On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields // J. Mech. and Phys. Solids. — 1969. — 17, № 3. — P. 201-207.
11. *Гэрсон А.* Континуальная теория вязкого разрушения, обусловленного образованием и ростом пор. — Ч.1. Критерий текучести и законы течения для пористой пластической среды // Теор. основы инж. расчетов. — 1977. — № 1. — С. 1-17.
12. *Скальський В. Р.* Оцінка накопичення об'ємної пошкодженості твердих тіл за сигналами акустичної емісії // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2003. — № 4. — С. 29-36.
13. *Лебедев А. А., Чаусов Н. Г.* Экспресс-метод оценки трещиностойкости пластичных материалов. — Киев: АН УССР, препринт, 1988. — 43 с.
14. *Панасюк В. В., Андрейкив А. Е., Партон В. З.* Основы механики разрушения материалов / Механика разрушения и прочность материалов. Справ. пос. в 4-х т. // Под общ. ред. акад. НАН Украины В.В. Панасюка. — Т.1. — Киев: Наук. думка, 1988. — 488 с.
15. *Работнов Ю. Н.* Влияние концентрации напряжений на длительную прочность // Изв. АН СССР. Сер.: Мех. твердого тела. — 1967. — № 3. — С. 36-41.
16. *Rabotnov Y. N.* Creep Rapture // Proc. 12th Int. Congress of Appl. Mech., Stanford Univ. — 1968. — Berlin: Springer, 1969. — P. 342-349.
17. *Волков С. Д.* К теории макротрещин. Сообщ. 2. Модели класса Мт. // Пробл. прочности. — 1981. — № 3. — С. 38-42.
18. *Волков С. Д., Дубровина Г. И., Соковнин Ю. П.* О краевой задаче механики разрушения // Там же. — 1978. — № 1. — С. 3-7.
19. *Волков С. Д.* Проблема прочности и механика разрушения // Там же. — 1978. — № 7. — С. 3-10.
20. *Волков С. Д., Дубровина Г. И., Соковнин Ю. П.* Устойчивость сопротивления материала в механике разрушения // Там же. — 1978. — № 6. — С. 65-69.
21. *Мак-Клинтон Ф., Аргон А.* Деформация и разрушение материалов. — М.: Мир, 1970. — 443 с.
22. *Hom C. L., Mc. Meeking R. M.* Three-dimensional Void Growth before Blunting Crack Tip // J. Mech. Phys. Sol. — 1989. — 37, № 3. — P. 395-416.
23. *Murakami S.* Damage Mechanics. Continuum Mechanic Approach to Damage and Fracture of Materials // J. Soc. Mat. Sci. Japan. — 1982. — 31, № 340. — P. 1-13.
24. *Tvergard V.* Influence of Voids on Shear Band Instability Under Plane Strain Conditions // Int. J. Fract. — 1981. — 17, № 4. — P. 389-407.
25. *Broek D.* Some Contributions of Electron Fractography to the Theory of Fracture // Intern. Metallurgical Review. — 1974. — 19. — P. 135-182.



## ГЕОМЕТРИЧЕСКИ ОБУСЛОВЛЕННЫЙ РЕСУРС ТРУБОПРОВОДА С КОРРОЗИОННЫМ ПОВРЕЖДЕНИЕМ

П. С. ЮХИМЕЦ

*Предложена методика оценки остаточного ресурса сварного трубопровода с объемным дефектом, учитывающая изменение геометрических параметров дефекта и основанная на использовании коэффициента концентрации напряжений, циклических свойств конструкционного материала и эксплуатационной нагруженности. Данная методика позволяет выполнять уточненную оценку остаточного ресурса трубопровода с коррозионным повреждением на основе учета усталостного повреждения, накопленного до его обнаружения и в прогнозируемый период.*

*A procedure is proposed for evaluation of residual life of welded pipeline with a volume defect, which allows for the change of geometrical parameters of the defect and is based on application of the coefficient of stress concentration, cyclic properties of structural materials and operating load. This procedure enables successful performance of a precise evaluation of residual life of a pipeline with corrosion damage based on allowance for the damage accumulated before its detection and in the predicted period.*

Одним из важных направлений повышения эксплуатационной надежности трубопроводов является совершенствование методов расчета, учитывающих наличие исходных дефектов изготовления и монтажа, повреждений вследствие влияния окружающей среды, условий и режимов эксплуатации, дегградации материала и других факторов, влияющих на их работоспособность. Изучение большого количества разрушений подземных сварных трубопроводов [1] позволило установить, что одной из основных причин отказов является коррозионное повреждение, происходящее вследствие нарушения защитного покрытия.

В работе [2] отмечается склонность трубопроводов АЭС из углеродистой стали, транспортирующих влажный пар в кипящих и водяных реакторах, к эрозионно-коррозионному износу в процессе эксплуатации. Значительное уменьшение толщины стенки, достигающее 1...1,5 мм/год, наблюдалось на трубопроводах многих АЭС, что приводило к их разрывам и влекло за собой остановки и ремонты. Данный тип повреждения характерен и для трубопроводов ТЭС [3]. Таким образом, характерной особенностью трубопроводов различного назначения является возникновение в процессе их эксплуатации так называемых объемных поверхностных дефектов — повреждений произвольной конфигурации с небольшой площадью поражения трубы.

Стремление к обеспечению конкурентоспособности и эффективности промышленных объектов обуславливает повышение действующих напряжений. Как результат, уже на стадии проектирования могут быть заложены значения рабочих номинальных напряжений в металле трубопроводов, довольно близкие к пределу текучести. Например, рас-

четные сопротивления растяжению (сжатию) основного металла  $R_1$  и  $R_2$  при проектировании в соответствии с работой [4] определяют по следующим формулам:

$$R_1 = \frac{R_1^n m}{k_1 k_n}, \quad R_2 = \frac{R_2^n m}{k_2 k_n},$$

где  $R_1^n, R_2^n$  — соответственно минимальные значения временного сопротивления и предела текучести материала трубы;  $m$  — коэффициент условий работы трубопровода;  $k_1, k_2$  — коэффициенты надежности по материалу;  $k_n$  — коэффициент надежности по назначению трубопровода.

Для трубопроводов первого класса в зависимости от различных сочетаний коэффициентов  $m, k_1, k_2, k_n$ , при проектировании возможны следующие диапазоны изменения расчетных сопротивлений:  $R_1 = (0,33...0,67)R_1^n$ ;  $R_2 = (0,43...0,82)R_2^n$ , что делает вполне возможным (с учетом концентрации напряжений в зоне повреждений) возникновение упругопластических деформаций.

Характерным для эксплуатации трубопровода оказывается периодическое изменение давления в трубопроводе от атмосферного до уровня давления перекачки и выше. Повторно-статические нагрузки при наличии геометрических неоднородностей в виде коррозионных или эрозионных повреждений приводят к повреждаемости конструкционного металла вследствие накопления необратимых микропластических деформаций. Увеличение плотности дислокаций и накопление повреждений — первая стадия процесса разрушения; последующими стадиями являются зарождение микротрещин, стабильный их рост и спонтанное разрушение.



Типичный излом при разрушении нефтепровода имеет выраженные зоны очага разрушения и дорыва. Наиболее вероятной причиной подобных разрушений является накопление повреждений и развитие исходных или возникнувших в процессе эксплуатации дефектов, в первую очередь, коррозионного характера, приводящее к появлению и распространению усталостных трещин от повторных воздействий внутреннего давления в процессе эксплуатации.

По данным работы [5] некоторые участки магистральных нефтепроводов могут испытывать в среднем 300...350 циклов повторных нагружений в год, вызванных различными технологическими и эксплуатационными факторами (отключение насосно-перекачивающих станций (НПС) из-за отказов электрооборудования, автоматики, механического оборудования, а также изменение режимов перекачки и т. п.). За время расчетного срока службы трубопровода (20 лет) суммарное число циклов нагружения внутренним давлением может составить в среднем порядка 7000...9000 циклов.

Периодическое изменение рабочей нагрузки характерно для всех видов трубопроводов. Вследствие этого большинство норм на проектирование трубопроводов предусматривает выполнение циклического расчета.

Вопросы статической прочности трубопроводов с объемными поверхностными повреждениями, которые включают коррозионные и эрозионные дефекты, рассматриваются в ряде нормативных документов [6–9]. Указания по оценке циклической прочности трубопроводов при наличии повреждений данного типа содержатся в работе [7]. Следует отметить, что данная оценка рекомендована уже в случае, когда общее число циклов изменения нагрузки за предыдущий и прогнозируемый периоды эксплуатации, например, внутреннего давления и/или температуры равно или превышает 150.

В работе [10] предложена методика оценки циклической прочности трубопровода с объемным поверхностным дефектом, геометрические

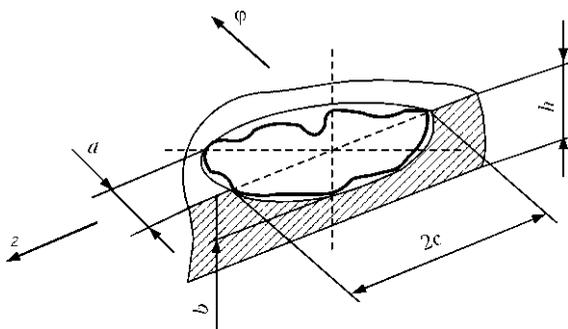


Рис. 1. Поверхностный дефект, моделируемый половиной эллипсоида:  $2c$  — длина;  $a$  — полуширина;  $b$  — глубина дефекта;  $h$  — толщина стенки трубы;  $z$  — осевое;  $j$  — кольцевое направление

параметры которого остаются неизменными. Напомним кратко ее основные положения.

Прогнозирование остаточного ресурса трубопровода основывается (наряду с эксплуатационной нагруженностью и циклическими свойствами материала) на данных о его напряженно-деформированном состоянии (НДС), в первую очередь, в зонах концентрации напряжений.

Учитывая, что в большинстве практических случаев рассматриваемые дефекты геометрически могут быть достаточно точно описаны с помощью эллипсоида (рис. 1), расчет местных максимальных деформаций ведется для поверхности эллипсоида на основе определения номинальных напряжений  $\sigma_n$  и концентрации напряжений  $\alpha_\sigma$ .

Из анализа условий эксплуатации трубопровода устанавливаются циклы нагружения, характеризующие наибольшими изменениями давления. Для упрощения дальнейшего изложения примем, что в процессе эксплуатации трубопровод испытывает только так называемые полные циклы, в которых внутреннее давление изменяется от 0 до рабочего давления.

Исходя из значения коэффициента концентрации напряжений, в упругой области деформирования  $\alpha_\sigma$  [12] вычисляется амплитуда максимальных напряжений в зоне дефекта  $\sigma_a^k$ :

$$\sigma_a^k = \sigma_n \alpha_\sigma$$

где  $\sigma_n$  — амплитуда интенсивности номинальных напряжений в полном цикле нагружения.

Если размах упругих напряжений пульсирующего цикла  $\Delta\sigma^k$  превышает предел текучести  $\sigma_T$ , то для дальнейшего расчета используют значение амплитуды относительной деформации в зоне дефекта:

$$e_a^k = K_e \frac{e_n}{e_T}$$

где  $e_n$  — амплитуда номинальных деформаций в цикле нагружения;  $e_T$  — интенсивность деформации, соответствующая пределу текучести;  $K_e$  — коэффициент концентрации деформаций в упруго-пластической области деформирования материала в зоне дефекта в цикле нагружения [13].

В этом случае остаточный ресурс трубопровода определяется как:

$$T_{\text{ост}} = \frac{1-d}{d_{\text{год}}}$$

где  $d_{\text{год}}$  — повреждаемость трубопровода за год эксплуатации,

$$d_{\text{год}} = \sum \frac{N_{\text{год}}}{[M]}$$

$N_{\text{год}}$  — частота повторяемости полных циклов в год;  $[M]$  — допускаемое число циклов нагружения, определяемое на основании найденных значений



амплитуды деформаций ( $e_a^k$ ) в зоне дефекта по расчетной усталостной кривой (1);  $d$  — суммарное накопление повреждения

$$d = \sum \frac{N_g}{[N]}$$

$N_g$  — фактическое число основных циклов нагружения трубопровода в процессе эксплуатации при наличии поверхностного дефекта.

В реальных условиях от момента зарождения дефекта до момента его обнаружения проходит некоторое время, в течение которого может быть накоплена существенная усталостная повреждаемость металла в зоне концентрации. Неучет повреждаемости, накопленной до момента обнаружения дефекта, может привести к завышению ресурса трубопровода. Помимо этого, прогноз остаточного ресурса должен учитывать изменение размеров дефекта во времени, так как при этом изменяется доля повреждаемости, накапливаемая в цикле нагружения. В связи с этим в настоящей статье предложена инженерная методика оценки циклической прочности работающего под внутренним давлением трубопровода с поверхностным объемным дефектом, которая учитывает изменение геометрических параметров дефекта в процессе эксплуатации.

На момент (0) обнаружения концентрация напряжений в зоне дефекта определяется для данной трубы геометрическими параметрами дефекта  $\alpha_g^{(0)} = f(a^{(0)}, b^{(0)}, c^{(0)})$ . Этому моменту времени и данным геометрическим параметрам дефекта соответствует 0-й цикл нагружения. Когда давление в цикле достигает максимальной величины, на поверхности дефекта возникают максимальные напряжения  $\sigma_g^{(0)} = \Delta\sigma^k$ , которые постепенно снижаются в направлении толщины стенки трубы (рис. 2).

Таким образом, распределение напряжений по толщине стенки в вершине дефекта описывается функцией  $\sigma_g^{(0)} = f(\sigma^{(0)}, s_g^{(0)})$ , где  $s_g^{(0)}$  — расстояние от вершины дефекта до  $g$ -го слоя в направлении нормали к наружной поверхности трубы в 0-м цикле нагружения.

В таком случае металл трубы в зоне дефекта можно представить в виде достаточно тонких слоев, в пределах которых при постоянном внутреннем давлении изменения напряжений в направлении толщины не происходит (рис. 3). Тогда при совершении 0-го цикла нагружения в каждом из  $g$ -х слоев накапливается усталостное повреждение:

$$dN_g^{(0)} = \frac{1}{[N_g^{(0)}]}$$

где  $[N_g^{(0)}]$  — допускаемое число циклов нагружения для  $g$ -го слоя, определяемое величиной напряжения  $\sigma_g^{(0)} = f(\sigma_0^{(0)}, s_g^{(0)})$  с использованием расчетной кривой усталости (1) с введенными коэффициентами запаса по деформациям  $n_e$  и долговечности  $n_N$ :

$$[N_g^{(0)}] = \left[ \ln \frac{1}{1 - \psi} \right] \left[ 4 e_T \left( e_a^k - \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_T} \right) \right] \tag{1}$$

где  $\psi$  — относительное сужение;  $\sigma_{-1}$  — предел выносливости.

Примем, что полные циклы, число которых в течение года эксплуатации трубопровода составляет  $N_{год}$ , повторяются через одинаковые промежутки времени  $\Delta T = 1/N_{год}$ .

Тогда на момент выполнения 1-го цикла размеры дефекта составят:

$$\begin{aligned} a^{(1)} &= a^{(0)} + V_a \Delta T, \\ b^{(1)} &= b^{(0)} + V_b \Delta T, \\ c^{(1)} &= c^{(0)} + V_c \Delta T, \end{aligned}$$

где  $V_a, V_b, V_c$  — соответственно скорость коррозии в направлении ширины, глубины и длины дефекта, которая в условиях отсутствия дополнительных сведений определяется так:

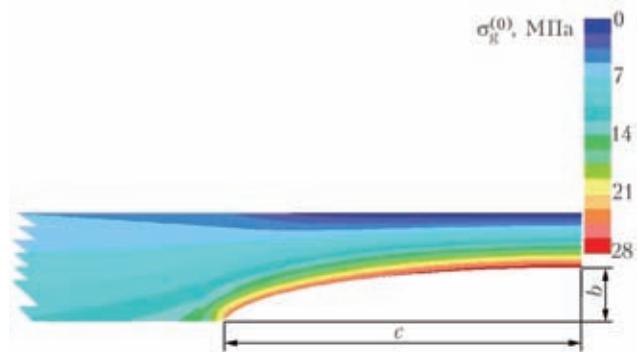


Рис. 2. Распределение интенсивности напряжений  $\sigma_g^{(0)}$  по толщине стенки трубы согласно расчету методом конечных элементов (МКЭ)

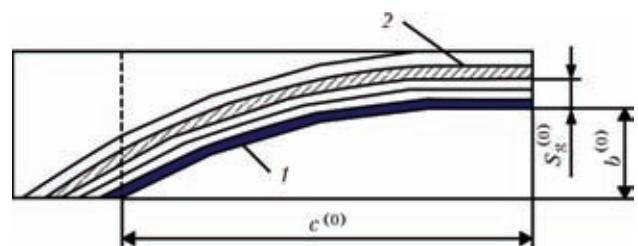


Рис. 3. Слои в зоне дефекта в момент времени (0): 1 — 0-й слой; 2 — 9-й

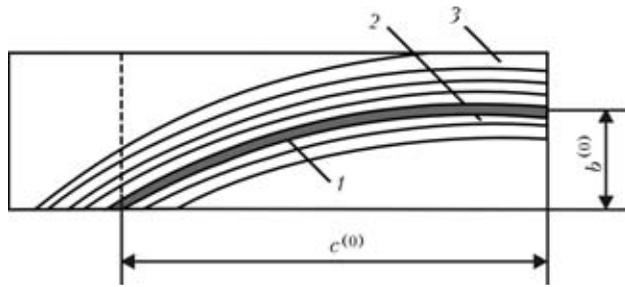


Рис. 4. Слои на момент времени (-2): 1 — 0-й слой; 2 — 1-й предыдущий; 3 — n-й слой

$$V_a = \frac{a^{(0)}}{T_3}, \quad V_b = \frac{b^{(0)}}{T_3}, \quad V_c = \frac{c^{(0)}}{T_3},$$

где  $T_3$  — время от начала эксплуатации до момента обнаружения дефекта (начало 0-го цикла).

Изменение глубины дефекта за промежутки времени  $\Delta T$  примем равным толщине слоя:

$$\Delta b = b^{(1)} - b^{(0)} = V_b \Delta T,$$

т. е. к моменту выполнения 1-го цикла количество слоев  $n^{(0)}$ , имевшееся по толщине стенки в вершине дефекта на момент (0), сократится на 1:

$$n^{(1)} = n^{(0)} - 1 = \text{int} \left[ \frac{s^{(0)}}{\Delta b} \right] - 1,$$

где  $s^{(0)}$  — толщина металла в вершине дефекта в момент (0),  $s^{(0)} = h - b^{(0)}$ .

При выполнении последующих  $t$  циклов в оставшихся  $g$ -слоях происходит накопление усталостного повреждения:

$$\sum_0^t dN_g^{(1)} = dN_g^{(0)} + dN_g^{(1)} + \dots + dN_g^{(1)}.$$

Если  $[N_g] \geq 10^6$ , то накопление повреждаемости в данном и более глубоких слоях не учитывается. Очевидно, что наиболее поврежденным является слой на поверхности дефекта. Если в какой-либо

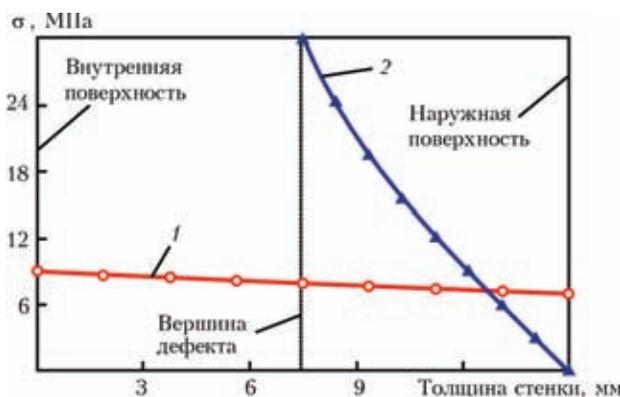


Рис. 5. Распределение интенсивности напряжений по толщине стенки трубы 300X15: 1 — вдали от дефекта; 2 — в вершине дефекта (длина 100, ширина 30, глубина 7,5 мм)

момент времени  $t$ :  $\sum_0^t dN_g^{(1)} \geq 1$ , то ресурс трубы

исчерпан и дальнейшая эксплуатация невозможна вследствие угрозы разрушения. В таком случае  $t$  и является остаточным ресурсом трубопровода на момент времени (0) без учета повреждения, накопившегося до этого момента.

Очевидно, что дефект существовал некоторое время до его обнаружения, в течение которого его геометрические размеры изменялись, и он мог накапливать соответствующее повреждение.

Для оценки возможной повреждаемости процесс коррозии необходимо воспроизвести в обратном порядке, прибавляя последовательно слои к исходному поверхностному слою (рис. 4) и производя вычисление повреждаемости в слоях  $(0^{(0)} \dots n^{(0)})$ . С добавлением каждого нового слоя исходные слои будут смещаться вглубь, а следовательно, возникающие в них напряжения будут снижаться и соответственно будет уменьшаться накапливаемое усталостное повреждение. В какой-то из моментов процесс прекращения накопления усталостного повреждения в более глубоких слоях дойдет до исходного 0-го слоя. Накопленное в исходных слоях  $(0^{(0)} \dots n^{(0)})$  к этому моменту усталостное повреждение и будет искомым — накопленным к моменту обнаружения дефекта, которое следует учитывать при прогнозировании остаточного ресурса конструкции.

Из сказанного выше следует, что при определении остаточного ресурса с использованием описанных выше подходов немаловажным является закон распределения напряжений по толщине стенки в вершине дефекта. Как свидетельствуют результаты расчета МКЭ (рис. 5) распределение носит приблизительно линейный характер. Максимальные напряжения на поверхности дефекта достаточно быстро убывают по направлению к поверхности трубы. Для упрощения последующих расчетов условимся (в запас прочности), что минимальные напряжения в точке поверхности, противоположной вершине дефекта, равны номинальным напряжениям —  $\sigma_n$ .

Эффективность разработанной методики оценивалась путем гидравлического испытания в режиме малоциклового нагружения трубы диаметром 530 мм, изготовленной Харцызским трубным заводом в 1961 г. из стали марки 14ХГС согласно ЧМТУ/УкрНИТИ 182-60. Труба с дефектами, обнаруженными во время внутритрубной диагностики, эксплуатировалась в составе магистрального нефтепровода (МН) «Дружба» в течение 43 лет при рабочем давлении 5 МПа. При этом число остановов в год составляло ~25.

Испытания проводили пульсирующим давлением  $\Delta P = 6$  МПа с частотой 1 цикл в минуту. После наработки 1100 циклов на поверхности де-



фекта была обнаружена усталостная трещина (рис. 6).

Механические свойства трубной стали, необходимые для оценки остаточного ресурса (табл. 1), были получены при испытании:

- стандартных плоских образцов, изготовленных из предварительно выпрямленных заготовок;
- цилиндрических образцов, изготовленных из заготовок, вырезанных в кольцевом направлении без их выпрямления (рис. 7).

Результаты расчета и эксперимента сопоставлялись для двух случаев (табл. 2):

- зарождение дефекта совпадает с началом эксплуатации (наиболее консервативный подход);
- зарождение дефекта произошло за 10 лет до его обнаружения.

При оценке были использованы механические свойства, определенные на образцах растяжения указанных выше типов.

Прогнозирование остаточного ресурса трубопровода при наличии дефекта осуществлялось с использованием результатов стандартных механических испытаний плоских образцов (табл. 3).

Как видим, оценка, основанная на ре-

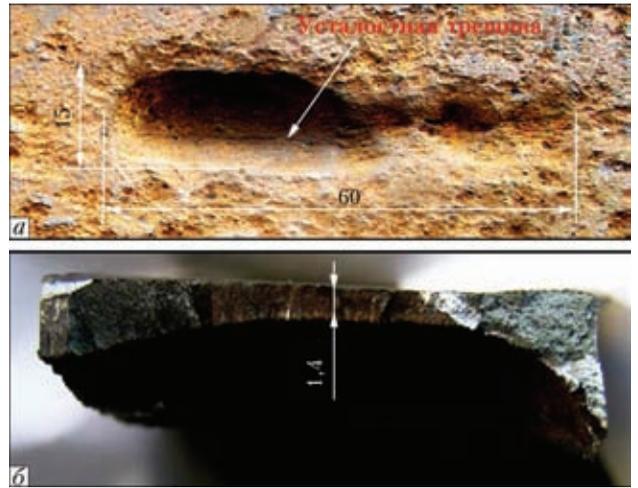


Рис. 6. Усталостная трещина: а — на внутренней поверхности; б — поверхность излома

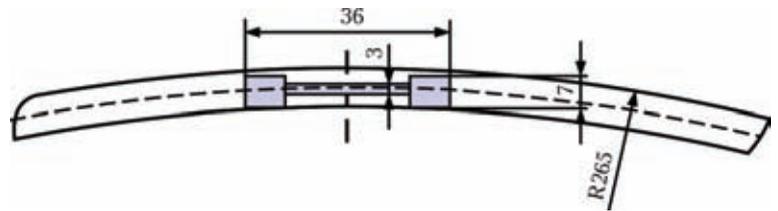


Рис. 7. Схема вырезки образца из трубы

зультатах испытаний стандартных плоских образцов, является достаточно консервативной. В свою очередь, различие механических свойств может объясняться их зависимостью от

направления вырезки образца и их изменением по толщине стенки трубы.

Оценка, основанная на предположении о зарождении дефекта одновременно с началом экс-

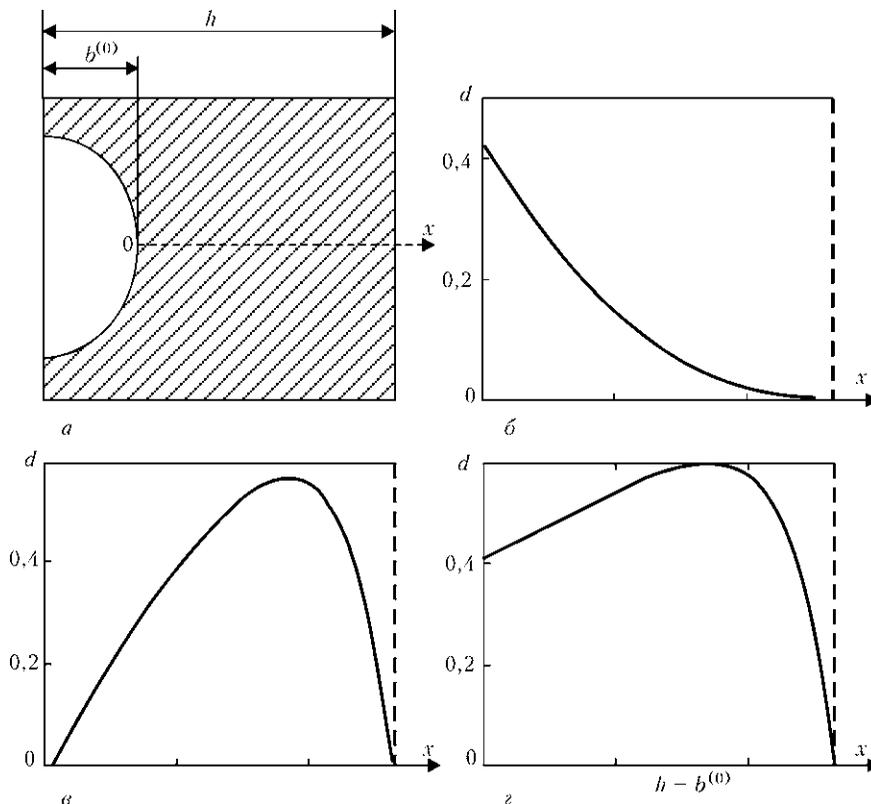


Рис. 8. Распределение усталостного повреждения  $d$  по остаточной  $(h - b^{(0)})$  толщине стенки вдоль оси  $X$ : а — накопленное; б — до обнаружения дефекта; в — после обнаружения до сквозного поражения стенки трубы; г — от начала эксплуатации до сквозного поражения



**Таблица 1. Механические свойства трубной стали**

Тип образца	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_t$ , МПа	$\psi$ , %
Стандартный выпрямленный, вырезанный в осевом направлении	584,4	390,4	42,9
Цилиндрический, вырезанный в осевом направлении	594,9	425,9	71,4

**Таблица 2. Результаты оценки усталостного повреждения  $d$  в эксперименте ( $n_e = 1, n_N = 1$ )**

Период развития дефекта, год	Усталостное повреждение $d$		
	эксплуатация	эксперимент	суммарное
43	0,17/0,03	2,63/1,04	2,80/1,07
10	0,04/0,01		2,67/1,05

*Примечание.* Перед чертой — оценка при использовании механических свойств, определенных на выпрямленных образцах, за чертой — на цилиндрических образцах.

**Таблица 3. Остаточный ресурс трубопровода  $N_{ост}$  ( $n_e = 2, n_N = 10$ )**

Период развития дефекта, год	Усталостное повреждение в процессе эксплуатации $d$	Остаточный ресурс	
		цикл	год
43	1,8	—	—
10	0,42	54	2,16

платации, свидетельствует о невозможности дальнейшей эксплуатации ввиду угрозы усталостного разрушения. Напротив, в случае возникновения дефекта за 10 лет до обнаружения, накопленное повреждение не превышает критического значения  $\sum_0^t dN_g^{(t)} < 1$  вплоть до сквозного поражения стенки трубопровода (рис. 8).

**Выводы**

Предложена инженерная методика оценки циклической прочности оборудования с поверхностным объемным дефектом, работающего под внутренним давлением, которая учитывает изменение геометрических параметров дефекта в процессе эксплуатации и основана на определении кон-

центрации напряжений в зоне дефекта, эксплуатационной нагруженности оборудования и циклических свойствах конструкционного материала и позволяет прогнозировать остаточный ресурс конструкции с учетом накопления усталостного повреждения в зоне дефекта в период до его обнаружения, а также в прогнозируемый период.

Экспериментальная проверка методики при циклических испытаниях натурных трубных образцов с эксплуатационными объемными поверхностными дефектами подтвердила возможность практического использования данной методики для определения остаточного ресурса реальных поврежденных объектов.

1. *Бородавкин П. П.* Подземные магистральные трубопроводы. — М.: Недра, 1982. — 384 с.
2. *Tanarro A., Tecnatom E.G., Avda S. A.* Montes de Oca «Erosion-corrosion in wet steam and single phase lines in nuclear power plants» proceedings of a specialists meeting «Erosion and corrosion of nuclear power plant materials». — Ukraine 19...22 sept., Kiev, 1994.
3. *Антикайн П. А.* Металлы и расчет на прочность котлов и трубопроводов. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 368 с.
4. *СНиП 2.05.06–85.* Часть II Нормы проектирования. Гл. 45. Магистральные трубопроводы.
5. *Прочность* труб магистральных нефте- и продуктопроводов при статическом и малоцикловом нагружении / М. И. Волский, А. С. Аистов, А. П. Гусенков, Л. К. Гуменный // *Обзорная информация.* Сер. Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. — М., ВНИИОЭНГ, 1979.
6. *ASME B31.8–1995.* Appendix L: Determination of remaining strength of corroded pipe.
7. *Fitness-for-service.* API Recommended practice 579. First ed., January 2000.
8. *Det Norske Veritas.* Recommended practice DNV-RP-F101. Corroded pipelines. Oct. 2004.
9. *ВБН В.2.3-00018201.04–2000.* Расчеты на прочность действующих магистральных трубопроводов с дефектами.
10. *Юхимец П. С., Гарф Э. Ф., Нехотяций В. А.* Экспериментальное обоснование метода расчета остаточного ресурса трубопроводов с коррозионными повреждениями // *Автомат. сварка.* — 2005. — № 11. — С. 17–21.
11. *Garf E. F., Netrebsky M. A.* Assessment of the strength and residual life of pipelines with erosion-corrosion damage // *The Paton Welding J.* — 2000. — № 9-10. — P. 13–18.
12. *Фокин М. Ф., Трубицын В. А., Никитина Е. А.* Оценка эксплуатационной долговечности магистральных трубопроводов в зоне дефектов. — М.: ВНИИОЭНГ, 1986. — 52 с.
13. *Козаев В. П., Махутов Н. А., Гусенков А. П.* Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность. — М.: Машиностроение, 1985. — 224 с.

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

*Поступила в редакцию 05.09.2010*



## ТЕХНОЛОГИЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ И ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ПАРОПРОВОДОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ПО УРОВНЮ МИКРОПОВРЕЖДЕННОСТИ МЕТАЛЛА

Е. Я. ВЕКСЛЕР, И. В. ЗАМЕКУЛА, В. Ю. ТОЛСТОВ, Е. В. СЕМЕШКО

*Рассмотрена проблема прогнозирования остаточного ресурса паропроводов высокого давления тепловых электростанций с наработкой, превышающей нормативную. На базе анализа результатов исследования более 1500 труб действующих паропроводов показана закономерная связь эксплуатационных изменений структуры, субструктуры и свойств стали с уровнем накопленной микрповрежденности. Предложена технология прогнозирования остаточного ресурса металла паропроводов по результатам оценки микрповрежденности в сочетании со стандартными методами диагностирования.*

*The paper deals with the problem of prediction of the residual life of high-pressure steam pipelines of thermal power plants with the operating life longer than the specified life. Analysis of the results of investigation of more than 1500 pipes of operating steam pipelines was used as the basis to demonstrate the regular interdependence of operational changes of structure, substructure and properties of steel with the level of accumulated microdamage. Technology of forecasting the residual life of steam pipeline metal by the results of evaluation of microdamage in combination with standard diagnostic techniques is proposed.*

Основное генерирующее оборудование Киевской энергосистемы с номинальными рабочими параметрами пара, температурой 535...560 °С и давлением 9,0...25,5 МПа к настоящему времени отработало нормативные сроки, а в ряде случаев срок эксплуатации важнейших узлов блоков достиг или значительно превысил расчетный (проектный) или парковый ресурс.

В этой ситуации использование методов оценки остаточного ресурса и прогнозирование надежной эксплуатации оборудования становится насущной проблемой.

Одним из наиболее ответственных открытых узлов энергооборудования станции являются главные паропроводы, транспортирующие пар высоких и сверхвысоких параметров от котла к турбине. При этом наиболее опасными зонами потенциального техногенного риска на паропроводе являются гнутые трубы, которые по конструктивным особенностям и технологии изготовления, а также за счет компенсационных нагрузок работают в условиях дополнительных рабочих напряжений на утоненной растянутой части гнба. Диагностирование состояния гнбов паропроводов обеспечивает надежность эксплуатации узла в целом.

В соответствии с требованиями действующих нормативных актов [1, 2], принятая в энергетике система постоянного мониторинга (технического диагностирования) состояния металла оборудования высокого давления (далее в/д) в процессе длительной эксплуатации использует различные не-

разрушающие методы исследования: визуальный контроль, измерительный контроль с определением остаточной деформации, толщины стенки и овальности труб, дефектоскопия, измерение твердости и расчет механических свойств, металлографический анализ [3–6]. В результате накоплен банк экспериментальных данных по служебным свойствам теплоустойчивых паропроводных сталей 12Х1МФ, 15Х1М1Ф и закономерностям их изменений во времени.

Природу этих изменений исследовали на вырезках из паропроводов с применением новейших методов анализа микроструктуры и субмикроструктуры металла. Установлено, что в условиях длительной эксплуатации теплоустойчивых сталей при высоких температурах и напряжениях происходит деградация структуры металла, связанная с развитием процессов старения, распада основного твердого раствора и фазовыми превращениями обособившихся карбидов.

Развивающиеся во времени структурные изменения приводят к изменению кратковременных и длительных прочностных и пластических свойств стали.

В условиях длительной работы металла паропроводов в/д наиболее существенны процессы, связанные с образованием, движением и взаимодействием дислокаций и других несовершенств кристаллической решетки [7]. При этом происходит непрерывное накопление повреждаемости материала за счет последовательного образования вакансий и их скоплений, одиночных пор, цепочек



пор по границам зерен, их роста и слияния в микротрещины, развития макротрещин. С момента образования микротрещин в металле процесс накопления остаточной деформации ползучести идет с возрастающей скоростью и переходит в стадию разрушения.

Таким образом, объективным критерием надежности металла является его интегральная физическая поврежденность, накопленная в процессе длительной эксплуатации в условиях высоких температур и напряжений, которая может быть выражена по суммарному количеству микродефектов кристаллической решетки.

Задача прогнозирования сроков безаварийной работы паропроводов в/д может быть решена путем экспериментальной оценки фактической накопленной микроповрежденности и расчета остаточного ресурса металла, что позволит надежно эксплуатировать его до начала образования дефектов в виде трещин.

**Неразрушающие методы оценки микроповрежденности металла.** Поврежденность металла в процессе эксплуатации в условиях ползучести определяется с помощью оптического металлографического микроскопа по степени поражения структуры микропорами, образующимися по границам и на стыках границ зерен.

На рис. 1 представлены характерные микроструктуры металла паропроводных труб из стали

12Х1МФ, эксплуатирующихся в условиях ползучести (*a* — микроструктура трубы после срока службы, составляющего половину паркового ресурса, с единичными микропорами на границах и стыках зерен; *б* — микроструктура трубы, отработавшей парковый ресурс, с большим количеством пор в виде цепочек по границам зерен; *в, з* — структура поврежденной трубы с межкристаллитными макро- и микротрещинами, а также крупными порами на границах зерен).

На практике оценка состояния металла паропроводов, отработавших нормативные сроки, выполняется неразрушающими методами металлографического анализа. При этом проводится [2] контроль по месту не менее трех гнутых труб каждой марки стали и типоразмера паропровода, а в случае, когда выявляется неблагоприятная структура первых проверенных труб, объем контроля может быть увеличен вплоть до 100 %.

Для систематических массовых металлографических исследований труб по месту, без вырезки образцов и разрушения детали применяются портативные оптические микроскопы, обеспечивающие качественное изображение объекта.

Анализ микроструктуры проводится на шлифах, приготовленных непосредственно на поверхности исследуемой трубы в зоне растянутой частигиба с максимальным утонением стенки или на утоненном участке прямой трубы. Шлифовка

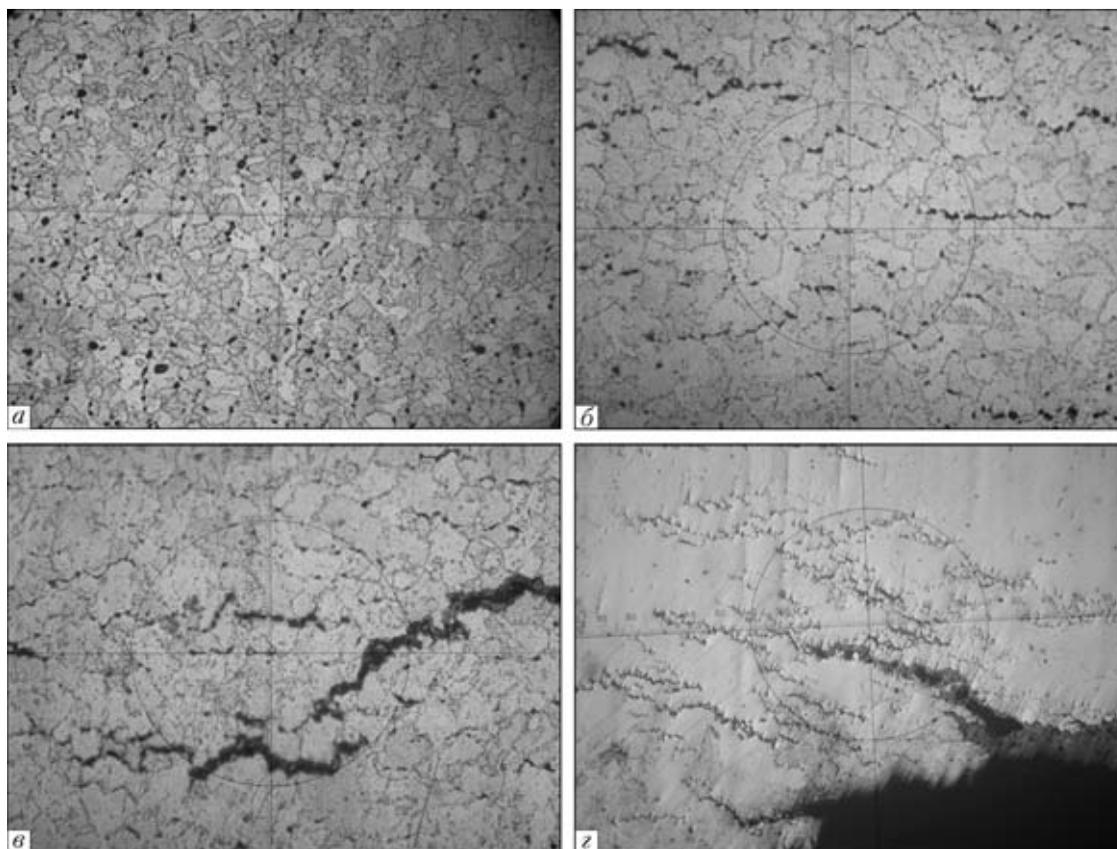


Рис. 1. Микроструктура металла паропроводных труб из стали 12Х1МФ с выявленными признаками микроповрежденности (*a* —  $\times 300$ ; *б, в* —  $\times 500$ ; *з* —  $\times 100$ )



поверхности выполняется алмазными эластичными дисками с различной величиной алмазного зерна, монтируемыми на электродрели. Для окончательной полировки шлифа используется окись хрома. Микроструктура металла выявляется методом химического травления стандартными травящими растворами [3, 6, 8].

Подготовленный микрошлиф изучается под микроскопом, после чего выполняется оттиск поверхности шлифа на пластиковых репликах. Готовые реплики исследуются на стационарном микроскопе в лабораторных условиях при увеличении 500 и 1000 раз.

На репликах-оттисках хорошо выявляются детали микроструктуры стали, микропоры размером 1...3 мкм на границах и стыках зерен, микротрещины различной протяженности. Качество микрофотографий структуры, снятых с реплик, практически не отличается от выполненных по стандартной методике на микрошлифах.

На рис. 2 показаны микроструктуры металла паропроводных труб, полученные на репликах с хорошо выявленными порами ползучести по границам зерен (рис. 2, а), цепочками пор по границам (рис. 2, б) и зародышевыми микротрещинами (рис. 2, в).

Неразрушающий контроль микроструктуры металла на репликах выполнялся при монтаже и в процессе длительной эксплуатации магистральных паропроводов из теплоустойчивых перлитных сталей 12Х1МФ и 15Х1М1Ф.

Обнаружена значительная разнородность структурного состояния металла труб. Систематизация структур по форме и распределению фазовых составляющих стали позволила представить многообразие наблюдаемых структур в виде пяти наиболее характерных типов, расположенных по степени распространенности на трубах исследованных паропроводов.

Как следует из анализа статистического распределения труб по типу исходной микроструктуры металла, количество труб с оптимальной сварочной структурой баллов 1–5 стандартной шкалы [9] (бейнит, феррит и мелкие карбиды) составляло примерно 65 % исследованных. Значительное количество труб (~ 30 %) имело структуры отжига в межкритическом интервале температур, состоящие из полиэдров феррита, перлита и структурно свободных карбидов, что соответствует браковочным баллам 7...9 шкалы [9].

Особенно существенна структурная неоднородность, выявленная на гнутых участках паропроводов, где в большинстве случаев структуры металлагиба и прямого участка трубы неодинаковы, что связано с технологией деформирования и термообработки гнутых труб при изготовлении.

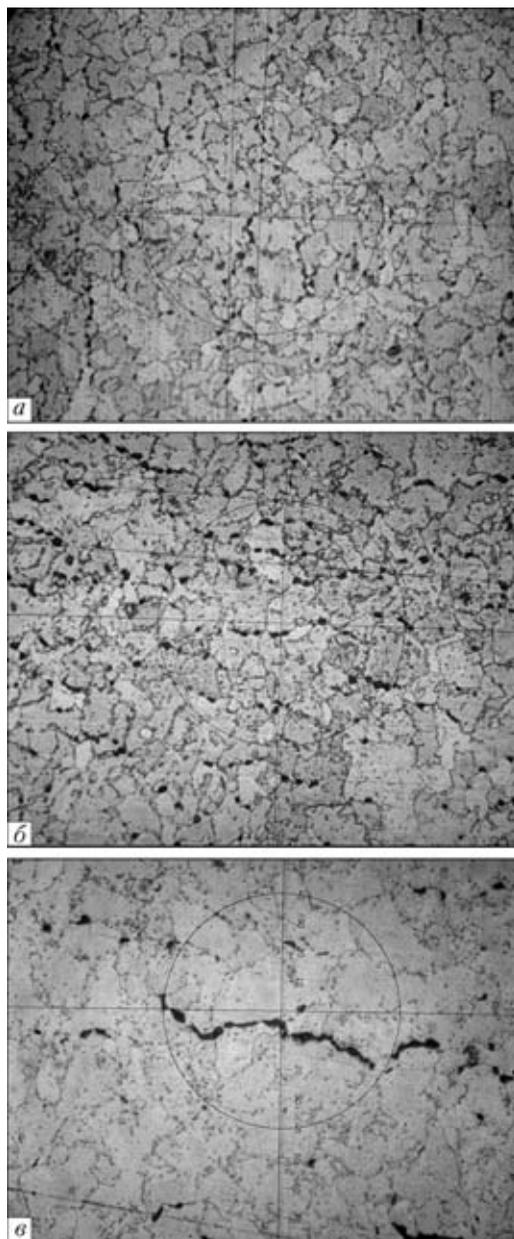


Рис. 2. Микроструктура металла паропроводных труб из стали 12Х1МФ, полученная на репликах (а, б —  $\times 500$ ; в —  $\times 1000$ )

Таким образом, исследованные действующие паропроводы, длительность эксплуатации которых в настоящее время превышает нормативную, смонтированы из труб, металл которых существенно различается по структуре и свойствам. Это обстоятельство, безусловно, сказывается на служебных свойствах конструкции и приводит к необходимости изучения поведения в процессе эксплуатации каждой трубы паропровода или группы труб с идентичной структурой.

С использованием неразрушающего метода металлографического анализа металла паропроводов в/д различных параметров пара, отработавших парковый ресурс, было проведено исследование микроструктуры и микрповрежденности более 1500 труб. Обобщенные данные микроструктур-



ного анализа металла гибов паропроводов, выполненного за период 2000–2008 гг., представлены в таблице.

По результатам анализа микроструктуры металла на репликах были выявлены единичные микропоры размером 1...2 мкм на стыках и границах зерен, цепочки пор размером 2...3 мкм по границам зерен и межкристаллитные микротрещины в материале, перешедшем в ускоренную стадию ползучести. Оценку степени поврежденности структуры проводили в соответствии с требованиями [2, 6] — выявленная микроповрежденность не должна превышать балла 4 по шкале [6], цепочки пор по границам зерен не допускаются [2].

Как видно из данных, приведенных в таблице, степень поврежденности металла гибов паропроводов остается допустимой (не более балла 4 [6]) в течение достаточно длительных сроков эксплуатации, составляющих при рабочей температуре 540 °С ~ 300 тыс. ч, при 545...550 °С ~ 250 тыс. ч и при 560 °С ~ 200 тыс. ч.

В основном поврежденность металла закономерно коррелирует с величиной остаточной деформации гибов, однако встречаются случаи, когда на гихах с повышенной деформацией были выявлены только единичные поры, что соответствует начальной стадии развития поврежденности (таблица, поз. 3, строки 8, 9, 12; поз. 4, строка 3).

Причина указанного несоответствия связана с локальным характером процесса накопления повреждаемости, а также, по-видимому, с особенностями конструкции и эксплуатационных факторов для конкретных деталей, что требует дополнительного исследования.

В то же время возможны случаи, когда при значительной степени поврежденности металла гига остаточная деформация трубы практически отсутствует (таблица, поз. 3, строки 7, 11). Подобные несоответствия закономерны и объясняются тем, что по принятой методике [2] деформация может быть измерена только на прямом участке гнутой трубы, в то время, как активное накопление микродефектов наблюдается на напряженных участках вершины гига. В такой ситуации приоритетом при оценке состояния металла гнутой трубы следует считать данные металлографического анализа.

По результатам диагностирования гнутые трубы с недопустимой остаточной деформацией и микроповрежденностью металла [2] были заменены, после чего паропроводы допущены к дальнейшей эксплуатации.

Длительный опыт применения технологии неразрушающего металлографического анализа на репликах показал практически неограниченные возможности метода для накопления данных по состоянию металла наиболее ответственных и, что

особенно важно, труднодоступных участков и узлов оборудования.

В то же время при оценке надежности дальнейшей эксплуатации металла, отработавшего нормативные сроки, с использованием данных неразрушающего контроля структуры, необходимо учитывать выборочность метода и то, что результаты анализа дают представление о микроповрежденности металла только на плоскости исследованного среза поверхности детали (шлифа). Кроме того, по данным анализа не может быть проведена количественная оценка остаточного ресурса, а практические рекомендации по результатам выполненного контроля носят качественный характер, что в производственных условиях не всегда является достаточным.

**Определение микроповрежденности и ресурса металла паропроводов по объемной плотности пор.** Наиболее информативным методом оценки структурной поврежденности мы считаем метод определения объемной плотности металла, которая может быть измерена на вырезках или сколах из труб паропровода по результатам прецизионного взвешивания образцов. Эта характеристика, как показано в ряде работ [10, 11], является универсальным критерием эксплуатационной надежности металла, отражающим влияние свойств материала и фактических условий его эксплуатации.

Сущность метода [11] заключается в сопоставлении плотности металла в исходном состоянии, когда практически поры в нем отсутствуют, после различных сроков эксплуатации и в момент разрушения. Критерием поврежденности металла считают отношение объема пор в момент времени  $V_t$  к объему пор в момент разрушения  $V_p$ :

$$\omega = \frac{V_t}{V_p} \quad (1)$$

Принято, что в исходном состоянии поврежденность материала  $\omega = 0$ , а в момент разрушения  $\omega = 1$ .

Объемная доля пор в металле в момент времени  $t$  рассчитана по формуле:

$$V_t = \frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_{исх}}, \quad (2)$$

где  $\rho_{исх}$  — плотность металла в исходном состоянии;  $\rho_t$  — то же, в момент времени  $t$ .

Накопление дефектов в металле (пористость) приводит к естественному снижению его плотности, поэтому одним из простых и физически обоснованных методов исследования поврежденности является прецизионное взвешивание.

Плотность металла измеряли по методу гидростатического взвешивания [11] с точностью до  $\pm 0,0001$  г на образцах массой от 5 до 20 г.



Микроповрежденность металла и остаточная деформация гибов паропроводов различных рабочих параметров и срока службы

Номер п/п	Оборудование	Узел	Рабочие параметры		Марка стали	Наработка, тыс. ч	Максимальная остаточная деформация, %	Оценка поврежденности по шкале [6], балл	
			T, °C	P, МПа					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	Котлы ТП-170, ТП-15, ТП-47 Турбины ПТ-60-90/13	Главный паропровод, сборный коллектор, пароперепускные трубы	540	10,0	12X1MФ	69	0,43	1-2	
			535	9,0		111	0,44	1-2	
						148	0,53	2	
						166	0,3	1	
						305	0,49	2	
						319	0,77	3-4	
					344	0,26	1-2		
2	Котлы БКЗ-210-140ПТ Турбины ПТ-50-130/7	Пароперепускные трубы	550	14,0	12X1MФ	76	0,49	1-2	
			545	13,0		154	0,50	1-2	
		Гибы пароохладителя				194	0,59	2	
			Котлы				201	0,48	1-2
3	Котлы ТГМП-344А Турбины Т-250/300-240	Паропровод «острого» пара	545	25,5	12X1MФ	139	0,37	2-3	
			540	24,0		150	0,36	1-2	
			Пароперепускные трубы				173	0,1	1
							180	0,44	2-3
		Паропровод «горячего» промперегрева	Пароперепускные трубы	545	4,0	15X1M1Ф	202	0,53	2
				540	3,85		138	0,33	1-2
				3,7	142		0,21	2-3	
					153		0,66	2	
					157		0,66	2	
					168		0,53	2	
					183		0,36	3-4	
					214		0,86	2	
					227		0,62	3-4	
			4	Котлы ТГМ-96А Турбины Т-100-130	Паропровод «острого» пара Пароперепускные трубы		560	14,0	15X1M1Ф
555	13,0	12X1MФ				210	0,55	2	
						210	0,76	1	
						221	0,47	2	
						235	0,53	2	
						241	0,49	2	
						256	0,50	2	
5	Котлы ТПП-210А Турбины К-300-240	Паропровод «острого» пара Паропровод «горячего» промперегрева Пароперепускные трубы	545	25,5	12X1MФ	118	0,2	1	
			540	24,0	15X1M1Ф	191	0,51	1	
				3,7		207	0,45	2	
				3,6		222	0,87	4-6	
						234	0,57	2	
						250	0,52	1-2	

Для исследования степени поврежденности гнутой трубы паропровода вырезали образец у внешней поверхности вершиныгиба. Это позволяет оценить объемную интегральную пористость металла у поверхности и в подповерхностном слое трубы, т. е. в наиболее вероятной зоне риска в условиях эксплуатации при повышенной рабочей температуре и напряжениях.

Плотность исследуемого металла определяется по формуле:

$$\rho_t = \frac{P_{\text{возд}} d_{\text{вод}} - P_{\text{вод}} d_{\text{возд}}}{P_{\text{возд}} - P_{\text{вод}}} \text{ (г/см}^3\text{)}, \quad (3)$$

где  $d_{\text{возд}}$ ,  $d_{\text{вод}}$  — соответственно плотность воздуха и воды при данной температуре и давлении (спра-

вочные данные);  $P_{\text{возд}}$ ,  $P_{\text{вод}}$  — масса образца на воздухе и в воде.

Полученную величину плотности исследуемого металла нужно сопоставить с плотностью его в исходном состоянии и в момент разрушения. Для каждой марки стали в состоянии после типовой термообработки эти характеристики постоянны. Так, плотность стали 12X1MФ в исходном состоянии составляет 7,835 г/см<sup>3</sup>, а в момент разрушения 7,778 г/см<sup>3</sup> [11]. Как видно из этих данных, дефект плотности при разрушении стали составляет всего 1...1,25 %, что требует обеспечения указанной высокой точности при проведении эксперимента.

Для расчета остаточного ресурса металла используется эмпирическая зависимость относитель-



ного времени до разрушения  $t/t_p$  от величины поврежденности  $\omega$ , полученной экспериментально по описанной методике. Кривая

$$t/t_p = f(\omega) \quad (4)$$

для стали 12Х1МФ показана на рис. 3.

Результаты исследования паропроводных труб, разрушенных вследствие ползучести, подтверждают справедливость такого подхода к прогнозированию ресурса [10].

Ниже, в качестве примера, приводятся данные контроля состояния металла трех труб паропроводов в/д, отработавших различные сроки эксплуатации.

1. Гиб пароперепускной трубы диаметром 219×25 мм из стали 12Х1МФ турбины Т-100-130-3, с номинальной рабочей температурой 545 °С и давлением 13,0 МПа, разрушился после 215 тыс.ч эксплуатации. Парковый ресурс указанногогиба в соответствии с [2] составляет 165 тыс. ч.

Повреждение представляет собой продольный разрыв растянутой частигиба трубы в виде хрупкой прерывистой трещины ползучести длиной 335 мм и раскрытием до 3 мм (рис. 4, а). На внешней поверхностигиба выявлена сетка тонких трещин, развивающихся параллельно магистральной на глубину ~ 1/3 сечения трубы.

Остаточная деформация поврежденной трубы, измеренная на прямом участкегиба, не превышает половину допустимой (0,4 % [2]) и составляет 0,38 %, скорость ползучести, измеренная на вершине растянутой частигиба, выше допустимой ( $0,8 \text{ \%}/\text{ч} \cdot 10^{-5}$  [2]) и составляет  $0,93 \text{ \%}/\text{ч} \cdot 10^{-5}$ . Овальностьгиба 1,3...2,1 %.

В зоне повреждения выявлены межкристаллитные макротрещины, заполненные окислами, и множество микротрещин ползучести (рис. 4, б). По границам зерен имеются цепочки пор и крупные (2 мкм) единичные поры (рис. 4, в),

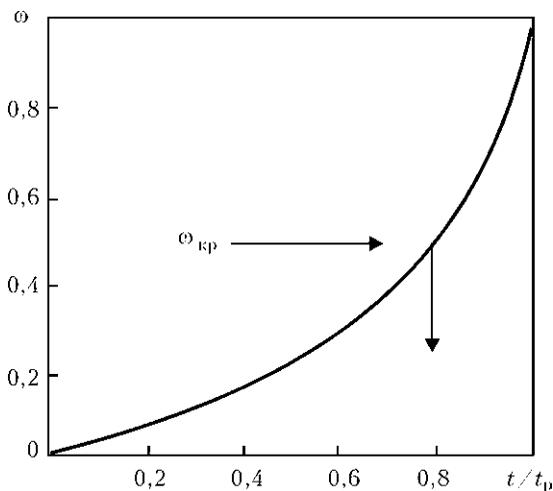


Рис. 3. Зависимость относительного времени до разрушения от величины поврежденности стали

что соответствует баллу 5 шкалы [6]. Микроструктура металлагиба деградирована, состоит из феррита и обособленных карбидов.

Прецизионное взвешивание образцов, вырезанных из растянутой частигиба, показало снижение плотности до  $7,767 \text{ г}/\text{см}^3$ . Величина поврежденности  $\omega$  здесь близка к 1, что соответствует истощению ресурса металла.

2. На главном паропроводе «острого пара» блока 100 МВт после 143 тыс. ч эксплуатации при номинальной рабочей температуре 560 °С и давлении 14,0 МПа произошло повреждениегиба трубы диаметром 325×38 мм из стали 12Х1МФ. Парковый ресурс указанногогиба в соответствии с [2] составляет 75 тыс. ч.

Повреждение имеет вид продольной прерывистой сквозной трещины длиной 380 мм с раскры-

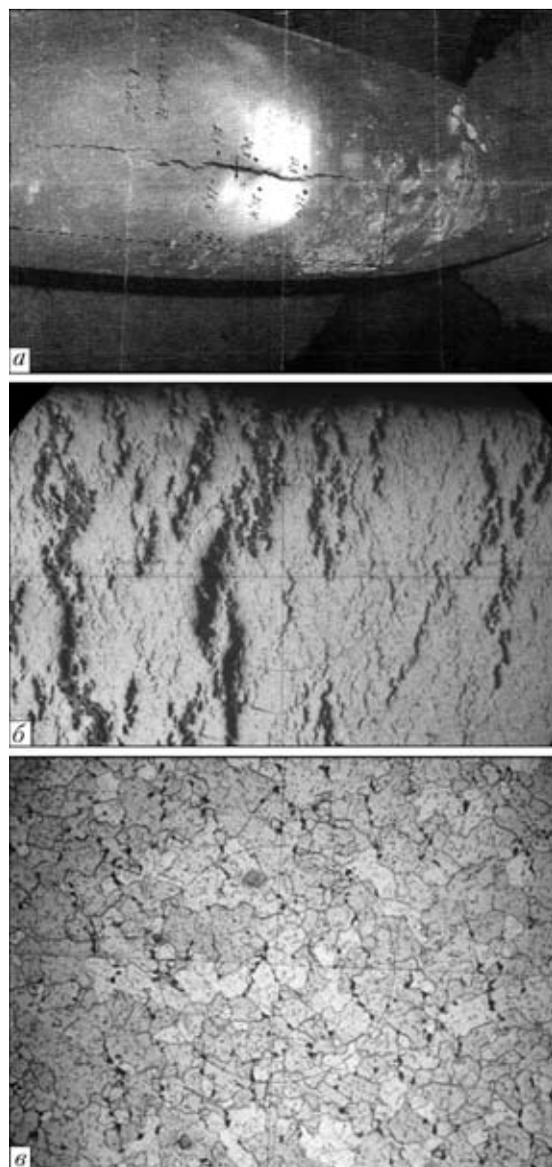


Рис. 4. Общий вид поврежденной трубы (а) и микроструктура металла трубы в зоне повреждения: б — ×100; в — ×500



тием до 2,5 мм, расположенной на растянутой части гйба.

Остаточная деформация поврежденной трубы, измеренная на прямом участке гйба, превышает половину допустимой и составляет 0,43 %, скорость ползучести за последние 15 тыс.ч. эксплуатации превышает допустимую и составляет  $1,1 \text{ \%}/\text{ч} \cdot 10^{-5}$ . Овальность гйба снизилась до 1,1 %.

В металле гйба выявлены цепочки пор и большое количество межкристаллитных макро- и микротрещин, развивающихся от наружной поверхности растянутой зоны.

Процесс накопления поврежденности протекает на фоне структурных изменений, связанных с полной дифференциацией микроструктуры.

Прецизионное взвешивание образцов поврежденной трубы показало локальное снижение плотности на растянутой части гйба до  $7,645 \text{ г}/\text{см}^3$ . Величина поврежденности  $\omega$  здесь более 1, что соответствует полному исчерпанию ресурса.

Таким образом, поврежденность оказывается более чувствительной характеристикой состояния металла, чем измеренная стандартным методом величина остаточной деформации и коррелирует со скоростью ползучести трубы. Так, деформация разрушенных гйбов 1,2 ниже допустимой, а ресурс, оцененный по поврежденности, исчерпан, что соответствует фактическому состоянию металла.

3. При плановом техническом диагностировании блока 250 МВт после 44 тыс. ч эксплуатации при температуре 545 °С и давлении 25,5/3,8 МПа была выявлена повышенная остаточная деформация труб паропровода «горячего» промперегрева. На гнутых трубах паропровода диаметром 630X25 мм из стали 15X1M1Ф деформация превышала допустимую и составляла 0,43...1,05 %, скорость роста деформации также была недопустимой —  $2,5 \cdot 10^{-5} \text{ \%}/\text{ч}$ . Парковый ресурс паропровода в соответствии с [2] составляет 270 тыс. ч.

Один из деформированных гйбов с максимальной скоростью роста деформации был исследован на вырезках.

Как показал металлографический анализ, микроструктура металла гйба была в удовлетворительном состоянии, без выраженных признаков старения. Микропоры и другие микродефекты в металле трубы отсутствовали.

Эти результаты подтвердились при определении плотности металла гйба, которая оказалась близкой к нормальной —  $7,8168 \text{ г}/\text{см}^3$ .

Было показано, что выявленная в данном случае деформация гйбов определяется, главным образом, изменением формы (овальности) нежесткого сечения так называемых «тонкостенных» труб во времени эксплуатации и не связана с процессами накопления микроповрежденности и развитием ползучести металла.

По результатам экспертно-технического анализа полученных данных была разрешена дальнейшая эксплуатация паропровода на номинальных параметрах до наработки паркового ресурса при условии учащенного диагностирования гйбов с деформацией, превышающей половину допустимой. Для повышения надежности работы указанного паропровода была произведена замена пяти гйбов, на которых деформация составляла 0,84...1,05 %, что превышает допустимую даже для прямых труб (1,0 % [2]).

К настоящему времени паропровод отработал 168 тыс. ч без повреждений.

**Технология диагностирования и оценка остаточного ресурса паропроводов по уровню микроповрежденности металла.** Как следует из приведенных данных, величина фактической плотности является структурно чувствительной характеристикой, отражающей суммарную поврежденность стали и определяющей ее остаточный ресурс.

Верхней границей надежности для Ст–Мо–V теплоустойчивых сталей можно считать степень поврежденности  $\omega = 0,5 \dots 0,6$ . После достижения этой величины  $\omega$  накопление поврежденности идет ускоренно и эксплуатация стали становится опасной. Допустимый срок службы может быть установлен по величине рассчитанного остаточного ресурса металла. При получении нулевого ресурса или близкого к нулевому (до 10 тыс. ч.) трубы паропровода подлежат замене.

Задача прогнозирования остаточного ресурса паропроводов в/д в системе Киевэнерго решается путем оценки интегральной, накопленной в процессе длительной эксплуатации, микроповрежденности металла.

На основе обобщения данных мониторинга энергооборудования в процессе эксплуатации длительностью до 350 тыс. ч принята технология прогнозирования остаточного ресурса паропроводов в/д по результатам структурного анализа степени поврежденности металла в сочетании со стандартными методами диагностирования.

На первом этапе выполняется неразрушающий металлографический контроль на репликах гйбов диагностируемого паропровода, отработавшего парковый ресурс, с выявлением микропор, их размеров и распределения в структуре металла. Исследуются все гйбы с остаточной деформацией более половины допустимой, овальностью менее 2 %, неудовлетворительной твердостью, или неудовлетворительными данными дефектоскопии.

Если гйбы с неудовлетворительными характеристиками на паропроводе отсутствуют, проводится контроль не менее трех гйбов каждого типоразмера и марки стали паропровода.

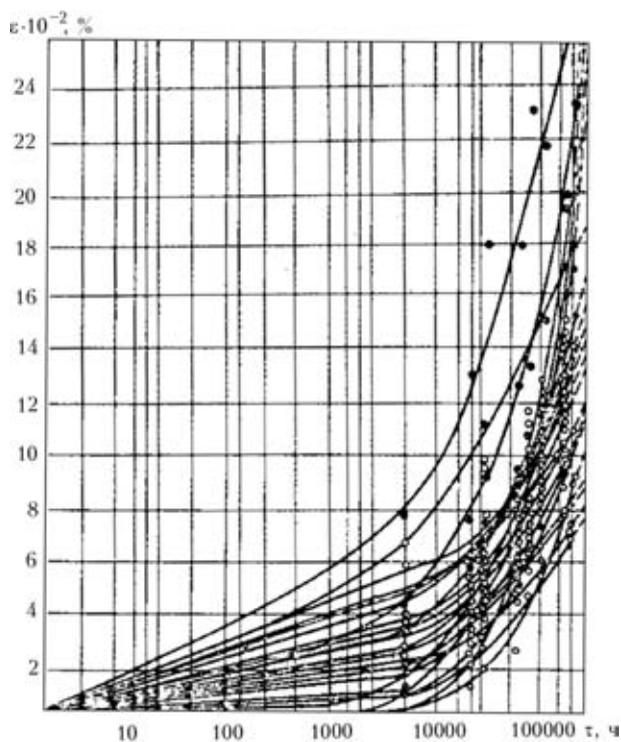


Рис. 5. Кривые роста остаточной деформации ползучести труб паропровода в процессе эксплуатации при 560 °С и давлении 14,0 МПа

По результатам контроля решается вопрос возможности дальнейшей эксплуатации паропровода.

В случаях, когда выявленная микрповрежденность металла труб не превышает допустимую, паропровод допускается к работе. Срок разрешенной эксплуатации определяется (качественно) с учетом наработки, условий эксплуатации и результатов диагностирования.

Если в числе исследованных имеются гибы с недопустимой поврежденностью [2, 6], вопрос о возможности и сроках дальнейшей эксплуатации паропровода может быть решен обоснованно по результатам определения остаточного ресурса металла. На этом этапе прогнозирования проводится вырезка из одной, худшей по результатам диагностирования, гнутой трубы паропровода для определения объемной плотности дефектов в металле и расчета по этой величине остаточного ресурса. Полученные данные исследования худшей гнутой трубы паропровода — «лидера» — используются для определения долговечности паропровода в целом.

Выбор трубы «лидера» из числа исследованных труб с недопустимым уровнем поврежденности может быть сделан по результатам анализа измерений деформации ползучести труб паропровода после различных сроков эксплуатации, представленных графически в виде зависимостей:

$$\varepsilon = f(\lg \tau), \quad (5)$$

где  $\varepsilon$  — остаточная суммарная относительная деформация ползучести, %;  $\tau$  — время работы, ч.

При рассмотрении серии кривых ползучести, относящихся к трубам одного паропровода (рис. 5), виден начальный период стабильности, за которым следует развитие процесса накопления деформации ползучести с постоянной скоростью. В то же время при соблюдении общей закономерности процесса, отмечаются существенные различия кривых ползучести, связанные с состоянием структуры металла и локальными особенностями условий эксплуатации данной трубы.

Построение серии кривых ползучести для данного паропровода позволяет легко выявить гибы с повышенной степенью деформации и скоростью ползучести и из них сделать выбор «лидера» для вырезки.

Многолетний опыт применения метода прогнозирования остаточного ресурса по структурной микрповрежденности в энергосистеме Киевэнерго позволяет считать предложенную технологию мониторинга состояния металла одним из современных подходов к решению проблемы оптимальной и экономичной эксплуатации паропроводов высокого давления.

## Выводы

Интегральным критерием эксплуатационной надежности паропроводов в/д из сталей 12Х1МФ и 15Х1М1Ф является фактическая накопленная микрповрежденность металла.

Представлены способы оценки поврежденности стали микропорами неразрушающим методом металлографического анализа и прецизионного определения плотности пор в материале на вырезках.

Предложена технология прогнозирования остаточного ресурса долговечности металла паропроводов в/д по уровню микрповрежденности.

1. ДНАОП 0.00.1.11–98. Правила будови та технічної експлуатації трубопроводів пари та гарячої води.
2. СОУ-Н МПЕ 40.1.17.401:2004. Контроль металу і продовження терміну експлуатації основних елементів котлів, турбін і трубопроводів теплових електростанцій. — Нормативний документ Мінпаливенерго України.
3. Векслер Е. Я., Чайковский В. М. Современные методы контроля структуры и свойств металла энергооборудования. — Изд. Укр. республ. науч.-техн. общества энергетики и электротехнической пром-ти. — Киев, 1982. — С. 62.
4. Неразрушающие методы контроля механических свойств металла энергооборудования в процессе длительной эксплуатации по твердости с использованием современных переносных твердомеров / Е. Я. Векслер, И. В. Замекула, В. Ю. Толстов, Е. В. Семешко // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2008. — № 1. — С. 39–42.
5. Опыт неразрушающего контроля механических свойств металла энергооборудования по твердости / Е. Я. Векслер, И. В. Замекула, В. Ю. Толстов, Е. В. Семешко // Энергетика та електрифікація. — 2008. — № 3. — С. 18–21.
6. ОСТ 34-70-690–96. Металл паросилового оборудования электростанций. Методы металлографического анализа в условиях эксплуатации. — М.: ВТИ, 1998.



7. *Теория ползучести и длительной прочности металлов / И. А. Одинг, В. С. Иванова, В. В. Бурдукский, В. И. Геминюв. — М.: Машгиз, 1959. — 420 с.*
8. *ГОСТ 5639. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна.*
9. *ТУ 14-3-460-2003. Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов.*
10. *Векслер Е. Я., Чайковский В. М. Оценка поврежденности и прогнозирование остаточного ресурса металла паропроводов высокого давления после длительной эксплуатации // Энергетика та електрифікація. — 1994. — №4. — С. 9-14.*
11. *Куманин В. И., Ковалева Л. А., Алексеев С. В. Долговечность металла в условиях ползучести. — М.: Metallургия, 1988. — 380 с.*

*Энергоналадка Киевэнерго,  
Киев*

*Поступила в редакцию  
08.07.2009*



**EF** European Federation for  
Non-Destructive Testing  
**NDT**



The Russian Society  
for Non-Destructive Testing  
and Technical Diagnostics

## 10<sup>th</sup> EUROPEAN CONFERENCE and EXHIBITION on NDT

2010, June 7-11, Expocentr, Moscow

[www.ecndt2010.ru](http://www.ecndt2010.ru)

Phone: +7 499 2467132, Fax: +7 499 2468888  
e-mail: [info@ecndt2010.ru](mailto:info@ecndt2010.ru), [exhibition@ecndt2010.ru](mailto:exhibition@ecndt2010.ru)

# NDT - basis of Safety!

## О ЛОКАЛЬНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ И ПРЕДЕЛЕ ОГРАНИЧЕННОЙ ВЫНОСЛИВОСТИ

В. Л. БУСОВ, В. А. ТРОИЦКИЙ, И. В. ШИШКИН

*Приведено теоретическое обоснование метода определения предела ограниченной выносливости в локальных объемах вблизи точек опасных сечений конструктивных элементов с применением неразрушающих акустических методов контроля: метода обратного рассеяния (акустическая кривая усталости (АКУ)), метода осцилляций сигнала (акустический аналог кривой роста микротрещин) и упрощенного метода акустической эмиссии (один канал без триангуляции). Приведена зависимость средней крутизны восходящего участка АКУ от амплитуды приложенного напряжения.*

*The paper gives theoretical substantiation of the method of determination of fatigue strength in local volumes near the points of critical sections of structural elements with application of non-destructive acoustic NDT methods, namely back-scattering method (acoustic fatigue curve (AFC)), signal scintillation method (acoustic analog of microcrack growth curve) and simplified acoustic emission method (one channel without triangulation). Dependence of average steepness of the ascending section of AFC on the applied stress amplitude is given.*

При определении предела выносливости  $\sigma_r$  [1, 2] критерием разрушения металлических образцов является «... возникновение трещин, определяемых методами дефектоскопии (например, магнитным, ультразвуковым или оптическим) ...». При определении  $\sigma_r$  необходимо учитывать поликристаллическое строение материала образца или детали и разрешающую способность методов дефектоскопии. Анализ современного состояния физики пластичности и разрушения [3, 4] при усталостных процессах [5] показывает, что минимальная длина устойчивых микротрещин 0,07...0,1 мкм связана как с наличием изломов и тройных стыков наследственных границ зерен, так и с границами возникших в процессе пластической деформации первичных (в поперечнике 0,1...1 мкм) и вторичных (0,01...0,1 мкм) фрагментов (нанофрагментов); микротрещины на таких границах возникают в результате взаимодействия двух механизмов разрушения — микросдвига и микроотрыва при достижении локальных микронапряжений на границах критических значений ( $\tau_c$ ,  $\sigma_c$ ), при этом значения напряжений на границах существенно выше по сравнению с объемами фрагментов [6]. Отсюда  $\sigma_r$  становится макрохарактеристикой, обусловленной влиянием локальных полей внутренних напряжений с учетом пространственных положений и ориентаций различных структурных элементов образца: фрагментов; зерен (10...300 мкм). Разрешающая способность капиллярного [7], магнитовихревого [8] и ультразвукового [8] НК колеблется в пределах 5...100 мкм. Однако традиционные методы не позволяют проводить контроль зарождения, роста и накопления повреждений (микротрещин, пор и т. д.) в процессе

эксплуатации детали (in situ) (кроме метода акустической эмиссии [9, 10]). Необходим такой метод или методы, которые обеспечили бы выявление начала зарождения устойчивых микротрещин, осуществили контроль за ростом их размеров и числа, и одновременно позволили найти амплитуду внешнего напряжения  $\sigma_a$ , при котором это происходит. Здесь необходимо отметить, что такая задача уже была поставлена в работе [11], где теоретически и экспериментально обоснована связь между процессами накопления усталостных повреждений и неупругого деформирования. В качестве датчиков усталостного повреждения были использованы тензорезисторы, позволяющие фиксировать форму и размеры петли механического гистерезиса, а вместе с ней энергию, на рассеянную на протяжении цикла. Кроме того, предложены соответствующие ускоренный метод определения  $\sigma_r$  на базе нескольких образцов, а в ряде случаев и одного образца, установка для его осуществления и деформационные и энергетические критерии усталостного разрушения, основанные на связи полной  $\Delta\varepsilon_\Sigma$  или пластической  $\Delta\varepsilon_{pl}$  деформации за цикл, коэффициента относительного рассеяния энергии за цикл  $\Psi^c$  от количества циклов до разрушения  $N$ . Как уже отмечалось, в начале разрушение происходит в локальных объемах зерен вблизи опасных точек опасных сечений элементов конструкций, а затем уже в результате необратимого процесса происходит увеличение размеров и количества устойчивых микротрещин в ансамбле, трансформация в очаг разрушения и объединение микротрещин в магистральную макротрещину.

В работах [12–15] рассмотрена акустическая кривая усталости (АКУ) — зависимость коэффициента затухания ультразвуковых волн  $\alpha_d$  от ко-



личества циклов  $N_c$ . Семейство таких кривых при различных значениях внешнего напряжения  $\sigma^{(i)}$ , от предела выносливости  $\sigma_r$  до предела прочности  $\sigma_b$ , и коэффициента асимметрии цикла  $r$  можно рассматривать как аналог классической кривой усталости  $\sigma^{(i)} = \sigma^{(i)}(N_c)$ . В настоящее время известны и другие аналоги классической кривой усталости: акустические — по скорости распространения ультразвуковых волн [16, 17], по скорости счета сигналов акустической эмиссии (АЭ), другим ее энергетическим и амплитудно-частотным характеристикам [18, 19]; магнитные — по коэрцитивной силе [20], по изменению магнитного потока, намагниченности с помощью датчика Холла [21], по амплитуде сигналов магнитоакустической эмиссии, сопровождающей шумы Баркгаузена [22]; оптические — по смещению линий интерференционных картин от лазерного излучения [23].

Приведенная выше АКУ содержит ряд характерных участков и точек: инкубационный период, участок снижения, минимум, восходящий участок, максимум, плато или участок слабого снижения. В работе [15] установлено соответствие между основными этапами пластической деформации и характерными участками и точками. Отмечено, что начало восходящего участка ([14], рис. 1, точка  $a$ ) соответствует началу зарождения устойчивых микротрещин, а его конец (там же, точка  $b$ ) — началу объединения ансамбля микротрещин в макротрещину в пределах зерен поликристалла. Кривая восходящего участка имеет в точке перегиба общую касательную, крутизна которой в основном зависит от приложенного внешнего напряжения  $\sigma^{(i)} = \sigma_a$  [12, 13]. Характер этой зависимости в литературе не описан. Кроме того, участок предразрушения, включающий максимум и участок слабого снижения, составляет, например, в условиях одноосного растяжения, не более 10 % общей долговечности образца [4].

В работе [24] рассмотрен критерий предшествующего разрушения для своевременной замены усталостно-поврежденного изделия, осуществляемый с помощью трех неразрушающих методов: упрощенного метода АЭ (один канал без триангуляции), метода обратного рассеяния (АКУ) и метода осцилляций сигнала. Показано, что метод осцилляций сигнала является активным низкочастотным аналогом метода АЭ.

Большой интерес также вызывают вероятностные модели (В-модели) накопления поврежденных [25], где такие процессы принимаются стохастическими и марковскими. Для серии стандартных образцов на базе экспериментальных данных: эмпирических выборочных распределений вероятностей строится математическая интегральная кривая распределения вероятностей

времени до отказа или долговечности  $F_w$  со своими средним временем долговечности  $m_w$  и дисперсией  $\sigma_w^2$ . Обращает на себя внимание подобие кривой восходящего участка АКУ и вероятностной кривой  $F_w$  по форме и расположению на плоскости первого квадранта системы координат независимо от вида нагружения, материала образцов и конструктивных элементов за исключением участка предразрушения, где на кривой АКУ имеет место максимум и слабое снижение, а на кривой  $F_w$  — медленное приближение к асимптоте.

Целью данной работы является построение подгоночной модели  $F_w$  путем оценки всех ее параметров и значений  $m_w$ ,  $\sigma_w^2$  на базе восходящего участка АКУ; рассмотрение ускоренного неразрушающего метода определения предела выносливости натурального образца или конструктивного элемента путем установления критерия усталостного разрушения на базе акустической кривой усталости, позволяющего найти зависимость средней крутизны ее восходящего участка от амплитуды внешнего напряжения, а вместе с ней и локальный предел ограниченной выносливости вблизи опасных точек опасных сечений этих элементов.

**Теоретическая модель.** Обозначим среднюю крутизну восходящего участка АКУ через  $\bar{\chi} = \text{tg}\beta$ . При  $\sigma_a \rightarrow \sigma_b$  угол  $\beta \rightarrow \pi/2$ ; при  $\sigma_a \rightarrow \sigma_r$  угол  $\beta \rightarrow 0$ . Качественное решение поставленной задачи приведено в работе [13], где рассматривается условие появления минимума на АКУ под влиянием двух эффектов — рассеяния на наследственных границах зерен и межфрагментных границах деформационного происхождения ( $\alpha_{gr} + \alpha_{fr}$ ), поглощения на линейных дефектах  $\alpha_d$  в процессе пластической деформации и третьего эффекта — рассеяния на границах микротрещин  $\alpha_{cr}$  [14]. Если третий эффект отсутствует (в образце нет микротрещин), а два первых эффекта влияния на характер кривой равны, но взаимно противоположны по знаку, то минимум АКУ вырождается в плато. Математическое условие такого вырождения можно записать в виде:

$$\frac{d\alpha_\Sigma}{dN} \Big|_{\alpha = \alpha_{\min}} = 0, \tag{1}$$

где значение  $\alpha_\Sigma$  рассматривается в виде суммы коэффициентов рассеяния на границах зерен  $\alpha_{gr}$ , фрагментов  $\alpha_{fr}$ , микротрещин  $\alpha_{cr}$  и поглощения  $\alpha_{ab}$ .

Вблизи минимума АКУ  $\frac{d(\alpha_{gr} + \alpha_{fr})}{dN} = -\frac{d\alpha_d}{dN}$  и выражение (1) упрощается:



$$\frac{d\alpha_{cr}}{dN}\Big|_{\alpha=\alpha_{min}} = 0. \quad (2)$$

В работе [26] проведена оценка всех вкладов деформирующего напряжения при фрагментации и найдено их соотношение. Здесь в первом приближении можно воспользоваться равномерным распределением привнесенной в образец энергии по вкладам, соответствующие трансляционные и поворотные моды пластичности осуществляют своевременную релаксацию этой энергии по объему без нарушения его сплошности. При  $\sigma_a > \sigma_r$  указанные выше моды уже не успевают своевременно перераспределять поступающую в образец энергию и единственным механизмом релаксации становится образование и рост микротрещин. Одним из основных достижений физики пластичности и разрушения является автомодельность процессов при фрагментации и зарождении и росте микротрещин, т. е. характер и последовательность процессов во фрагментированном объеме и в вершине микротрещины совпадают [ 27, 28]. Отсюда по аналогии с выражением составляющей тензора деформирующего напряжения  $\sigma_f$ , работа которой идет на рост упругой энергии фрагментов [26, 29], можно построить составляющую  $\sigma_{cr}$ , работа которой идет на зарождение и рост устойчивых микротрещин, заменив координату  $z$  (пространственное представление) на количество циклов  $N$  (временное представление):

$$\hat{\sigma}_{cr}(N) = \frac{1}{\gamma_\alpha} \hat{c}^* \cdot \left[ \frac{d\alpha_{cr}}{dN} (\hat{E}^{el}(N))^2 + \alpha_{cr} \hat{E}^{el} \cdot \frac{d\hat{E}^{el}(N)}{dN} \right] \times \left( \frac{d\hat{E}^{pl}(N)}{dN} \right)^{-1}, \quad (3)$$

где  $\hat{c}^*$  — эффективный тензор модулей упругости [29];  $(\cdot)$  — оператор свертывания индексов;  $\hat{E}^{el}$ ,  $\hat{E}^{pl}$  — тензоры средней упругой и соответственно пластической деформации; коэффициент пропорциональности  $\gamma_\alpha$  в рэлеевском приближении приведен в работе [24], причем  $\alpha_{cr} = \gamma_\alpha n_{cr} V_{cr}$ , где  $n_{cr}$  — плотность микротрещин;  $V_{cr}$  — средний объем микротрещины. Если обозначить количество циклов до начала появления микротрещин через  $N_a$ , то в начале восходящего участка АКУ (точка  $a$ ) средние деформации равны соответственно  $\hat{E}_a^{el}$ ,  $\hat{E}_a^{pl}$ ; первый член в квадратных скобках обратится в нуль, а произведение  $\hat{c}^* \cdot \hat{E}_a^{el}$  можно рассматривать как циклический предел упругости  $\sigma_c^{el}$  [11].

Отметим, что в методе обратного рассеяния [30] алгоритм обработки сигналов, рассеянных от структуры ультразвуковых волн, играет основную

роль, причем выделение информации проводится путем стробирования участков огибающей рассеянного эхо-сигнала. Как известно, время релаксации растет с увеличением размеров исследуемой системы [31], в данном случае размера участка стробирования  $L$ . В связи с этим представляет интерес режим циклического нагружения [11] образца диаметром 5...12 мм, где имеет место ступенчатое повышение нагрузки с высотой ступени 10...20 МПа и шириной  $\Delta N = 10^4 \dots 10^5$  циклов. Отсюда при длине участка стробирования 3...5 мм локальный предел выносливости  $\sigma_{rN}$  совпадает с глобальным  $\sigma_r$ , при длине участка, равной минимально возможной цене деления шкалы экрана  $1 \cdot 10^{-4}$  м этот предел отличен от  $\sigma_r$ . Условие (2) отражает математический смысл и для практики должно быть модифицировано. Для этого отношение дифференциалов  $d\alpha_{cr}$  и  $dN$  в правой части (2) заменяем отношением порога абсолютной чувствительности акустического тракта  $(\Delta\alpha)_{п.ч}$  к  $\Delta N(L)$ , причем при минимальном участке стробирования ширина ступени снижается до  $10^3 \dots 10^4$  циклов, а разность  $\sigma_a - \sigma_{rN}$  не должна превышать порог абсолютной чувствительности силоизмерительного тракта  $(\Delta\sigma)_{п.ч}$  (для тензорезисторов этот порог порядка 1 МПа); в результате равенство (2) переходит в неравенство:

$$\frac{d\alpha_{cr}}{dN}\Big|_{\alpha=\alpha_a} \leq \frac{(\Delta\alpha)_{п.ч}}{\Delta N(L)}. \quad (4)$$

Согласно иерархии структурных уровней деформации [3, 4, 6] система уравнений: вид уравнений, характер и форма зависимостей, описывающих процессы пластической деформации (ПД) и разрушения, на каждом структурном уровне свой, но в пределах уровня один и тот же. Например, на макроуровне для объема образца и пробного объема из произвольного наследственного зерна и его ближайших соседей-зерен типа кластера. Поэтому эмпирическое уравнение Мэнсона, связывающее размах полной деформации образца  $\Delta\varepsilon$  с количеством циклов до разрушения  $N_d$  для малоциклового усталости:

$$\Delta\varepsilon = 2\varepsilon_a = 3,5 \frac{\sigma_b}{E} N_d^{-0,12} + e_d^{0,6} N_d^{-0,6}, \quad (5)$$

где первый член правой части представляет предельную упругую деформацию, а второй — предельную пластическую деформацию;  $E$  — модуль Юнга;  $e_d$  — истинные удлинения образца при разрушении (было распространено В. Т. Трошенко на многоцикловую усталость [11] и может быть использовано для указанной группы (кластера зерен).

Необходимо отметить, что при случайном распределении ориентаций зерен удлинения  $e_d$  для



различных зерен различны. Например, при удлинении образца 5 % удлинения ансамбля зерен могут колебаться от 2 до 4 % [32]. Совпадение удлинений для поликристаллического образца и отдельных зерен-монокристаллов, подчиняющихся при одноосном растяжении закону Шмида [32], возможно при существовании текстур и может быть использовано только в рамках грубой оценки.

Обозначим количество циклов в точке перегиба восходящего участка АКУ через  $N_{kn}$ , а средние деформации и коэффициент затухания ультразвуковых волн — соответственно  $\hat{E}_{kn}^{el}$ ,  $\hat{E}_{kn}^{pl}$  и  $\alpha_{cr}^{(kn)}$ . Будем считать, что средние внутренние деформации  $\hat{E}^{el}$ ,  $\hat{E}^{pl}$  как функции  $N$ , приближенно совпадают со значениями внешних предельных упругих и пластических деформаций в (5) для кластеров зерен, т. е.  $\hat{E}^{el}(N_d)$  и т. д. Отсюда из выражения (3) с помощью (2), (5) при  $\sigma_{cr}(N_{kn}) = \sigma_a$  можно оценить среднюю крутизну восходящего участка АКУ:

$$\text{tg}\beta = \frac{\alpha_{cr}^{(kn)} - \alpha_{\min}}{N_{kn} - N_a} = k_1(N)\sigma_a - k_2(N)\sigma^{el}(N), \quad (6)$$

где

$$k_1 = \frac{\gamma_\alpha}{2W(N)}, \quad (7)$$

$W(N)$  — удельная упругая энергия деформируемого поликристалла;

$$k_2 = 0,7 \frac{\alpha_{cr}\sigma_b}{\gamma_\alpha E e_d^{0,6}} N^{0,48}, \quad (8)$$

$$\sigma^{el}(N) = \hat{c}^* \cdot \hat{E}^{el}(N) \approx 1,75 \sigma_b N^{-0,12}. \quad (9)$$

Для данного восходящего участка со своей средней крутизной  $\bar{\chi}$  как функцией  $\sigma_a$  существует соответствующая кривая  $F_w$  со своими  $m_w(\sigma_a)$ ,  $\sigma_w^2(\sigma_a)$ . Действительно, для трех точек классических кривых усталости (кривых Веллера), полученных для больших выборок стандартных и плоских образцов (75...300) из нескольких марок сталей и алюминиевых сплавов были найдены зависимости «логарифм  $m_w$  — напряжение  $\sigma_a$ », «логарифм дисперсии  $\sigma_w^2$  — напряжение  $\sigma_a$ » и «отношение сигнал—шум:  $m_w/s_w$  — средняя долговечность  $m_w$ ». Первые две кривые являются отрезками убывающих гипербол с ростом  $\sigma_a$ ; третья — выпуклая вверх парабола, имеет ярко выраженный максимум. Если воспользоваться наиболее простой стационарной В-моделью с единичными скачками [25], где существенны только два пара-

метра:  $b$  — целое число, равное числу ступеней выборочной ступенчатой функции (ВФ) распределения вероятностей :

$$b = \frac{N_{\max}}{\Delta N(L)}, \quad (10)$$

где  $N_{\max}$  — количество циклов, соответствующее максимуму на кривой АКУ;  $\Delta N(L)$  — ширина ступени ВФ;  $r_j = p_j/q_j$  — отношение вероятностей сохранения состояния в пределах данной  $j$ -й ступени  $p_j$  и перехода в новое состояние, с более высокой степенью поврежденности  $q_j$ , причем  $r_j = r_c = \text{const}$ , то для первых двух кривых: 1) из (6)–(9) становится очевидной надежная корреляционная связь между значением средней крутизны  $\bar{\chi}$  восходящего участка АКУ и данной кривой  $F_w(b; r_c; a_w)$  с вероятностью выживания  $a_w$ ,  $a_w = 0,05; 0,1; 0,15$ ; 2) связь величин  $m_w$ , отношения  $m_w/\sigma_w$  и параметров  $b, r_c$  можно выразить в виде системы простых уравнений:

$$m_w = (b - 1)(1 + r_c), \quad (11)$$

$$\frac{m_w}{\sigma_w} = \sqrt{m_w/r_c}, \quad (12)$$

где  $\sigma_w$  — среднее квадратичное отклонение выборки.

Третья кривая  $m_w/\sigma_w - m_w$  (12) приводит к гипотезе Статга: «отношение сигнал/шум зависит только от  $m_w$ , но не зависит от среднего напряжения цикла» [25]. Отсюда, задав  $r_c$ , легко произвести оценку  $b$ . В то же время условие  $r_j = \text{const}$  на всем интервале восходящего участка АКУ является физически нереальным вследствие монотонно возрастающего упрочнения в среднем, но может быть распространено на любую пару рядом стоящих ступеней ВФ.

Таким образом, при определении  $\sigma_{rN}$  известные ступенчатые режимы нагружения [11] можно изменить, разбивая их на пары ступеней и применяя к этим парам метод последовательных приближений, когда одна из ступеней пары имеет  $\sigma_a > \sigma_r$ , а другая —  $\sigma_a < \sigma_r$ , причем пары ступеней разделены либо скачком вверх, если вторая ступень пары имеет  $\sigma_a < \sigma_r$ , либо скачком вниз, если вторая ступень пары имеет  $\sigma_a > \sigma_r$ . Такой режим проводится до тех пор, пока высота ступени очередной пары не совпадет с порогом абсолютной чувствительности силоизмерительного тракта  $(\Delta\sigma)_{п.ч}$  [33]. **Обсуждение результатов.** В основе данного подхода заложена идея замены совокупности стандартных образцов при усталостных испытаниях на ансамбль кластеров зерен — монокристаллов, определяющая по существу идеальное техничес-



кое решение (ИТР). Здесь мы стремимся максимально приблизиться к этому решению. Для этого на частоте заполнения ультразвукового звука импульса 10 МГц участок стробирования на экране дефектоскопа длиной 3...10 мм разбивается на 50...100 отрезков, каждый из которых соответствует одному пробному объему с площадью основания — поверхности пьезопреобразователя и высотой на размер кластера зерен. Для такого пробного объема изначально имеет место усреднение по поверхности пьезопреобразователя, что не позволяет произвести такую замену для решения, полностью адекватного ИТР. Тем не менее, в ряде случаев: поликристаллов преимущественной ориентировки с малым разбросом, текстур после прокатки, волочения и поверхностной закалки и т. д. эта процедура замены становится приемлемой.

Такой подход принципиально отличается от уже существующего тем, что в нем напрямую учитывается стохастичность процесса ПД и разрушения поликристаллических материалов через использование ряда случайных распределений ансамбля фрагментов, зерен, микротрещин по количеству, размерам и ориентациям в пространстве и времени. Благодаря этому и возникает качественное подобие кривых  $F_w$  и восходящего участка АКУ. Для строгого количественного обоснования этого подобия необходимо знать вид этих распределений и характер их эволюции во времени в каждом конкретном случае: материал, размеры, состояние поверхности образцов, вид нагружения, влияние окружающей среды и т. д., что само по себе представляет сложную задачу. Поэтому в данной работе ограничимся описанным выше феноменологическим подходом.

Порог абсолютной чувствительности акустического тракта при данном подходе не превышает цену деления аттенюатора дефектоскопа 0,1...1 дБ [8]. Теоретический порог абсолютной чувствительности внутренних механических напряжений без учета чувствительности измерительной аппаратуры определяется произведением минимально возможной погрешности измерения деформаций: 1 мкм/м [34] и модуля Юнга для константана и сплава карма  $(1,2...1,6)10^{11}N$  [35], т. е. 0,1 МПа. На практике при деформациях на протяжении цикла не ниже  $1 \cdot 10^{-5}$  мм/мм [11] оценка этого порога  $(\Delta\sigma)_{п.ч}$  составляет 1...2 МПа в зависимости от материала тензорезистора.

## Выводы

1. Предложен новый ускоренный метод определения долговечности и предела ограниченной выносливости в локальных объемах вблизи опасных точек опасных сечений конструктивных элементов с помощью трех неразрушающих акустических ме-

тодов контроля: упрощенного метода АЭ (один канал без триангуляции), метода обратного рассеяния на базе АКУ и метода осцилляций сигнала как аналога кривой роста микротрещин.

2. Данный метод имеет следующие характеристики: локальность контроля не ниже  $0,1 \times 3 \times 6$  мм<sup>3</sup>; толщина информационного слоя до 100 мм.

3. Метод позволяет контролировать конструктивный элемент непосредственно в процессе его эксплуатации и произвести своевременную замену усталостно-поврежденного элемента для его возможного восстановления методами обработки металлов давлением [24, 36].

1. Писаренко Г. С., Квітка О. Л., Уманський Е. С. Опір матеріалів. — Киев: Вища шк., 2004. — С. 562–570.
2. Коцаньда С. Усталостное растрескивание металлов. — М.: Металлургия, 1990. — 623 с.
3. Панин В. Е., Лихачев В. А., Гриняев Ю. В. Структурные уровни деформации твердых тел. — Наука: Новосибирск, 1985. — 228 с.
4. Рыбин В. В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. — М.: Металлургия, 1986. — 224 с.
5. Синергетика и усталостное разрушение металлов / Под ред. В. С. Ивановой. — М.: Наука, 1989. — 247 с.
6. Владимиров И. В. Физическая природа разрушения металлов. — М.: Металлургия, 1984. — 280 с.
7. Маслов Б. Г. Дефектоскопия проникающими веществами. — М.: Высш. шк., 1991. — 255 с.
8. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Справ. В 2-х кн. Кн. 2 / Под ред. В. В. Ключева. — М.: Машиностроение, 1986. — 352 с.
9. Грешиников В. А., Дробот Ю. В. Акустическая эмиссия (применение для испытаний материалов и изделий). — М.: Изд-во стандартов, 1976. — 272 с.
10. Иванов В. И., Белов В. М. Акустико-эмиссионный контроль сварки и сварных изделий. — М.: Машиностроение, 1981. — С. 256.
11. Троценко В. Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении. — Киев: Наук. думка, 1981. — 342 с.
12. Бусов В. Л., Шермергор Т. Д. Рассеяние ультразвуковых волн в поликристаллах при развитой пластической деформации на стадии фрагментации // Физика и техника высоких давлений. — 2002. — № 1. — С. 60–64.
13. Бусов В. Л. Поглощение ультразвуковых волн в пластически деформированных поликристаллах // Там же. — 2005. — С. 112–116.
14. Бусов В. Л. Рассеяние ультразвуковых волн на микротрещинах в фрагментированных поликристаллах // Акустический вестник НАНУ. — 2007. — № 3.
15. Hirotsugu J., Yoshikiyo M., Masahiko H. Acoustic study of dislocation rearrangement at later stages of fatigue. Noncontact prediction of remaining life // J. Appl. Phys. — 2002. — № 91, № 4. — С. 1849.
16. О зависимости скорости распространения ультразвука от числа циклов при усталостных испытаниях / С. В. Коновалов, С. Н. Горлова, О. С. Лейкина // III Всерос. науч.-техн. конф. «Новые химтехнологии: производство и применение». — Пенза: Изд-во Приволж. Дома знаний, 2000. — С. 25–26.
17. Грецкая И. А., Коновалов С. В., Соснин О. В. Возможность построения кривых усталости по данным измерения скорости ультразвука // Изв. вузов. Черная металлургия. — 2002. — № 11. — С. 77.
18. Буденков Г. А., Недзвецкая О. В., Бахтин А. В. Акустика растущих трещин // Вестник Ижевск. гос. тех. ун-та. — 1998. — № 1. — С. 20–26.
19. Пенкин А. Г., Терентьев В. Ф., Маслов Л. И. Оценка остаточного ресурса работоспособности трубных сталей с использованием методов акустической эмиссии и кине-



- тической твердости. — М.: Интерконтакт Наука, 2005. — С. 69.
20. *Безлюдько Г. Я.* Эксплуатационный контроль усталостного состояния и ресурса металлопродукции неразрушающим магнитным коэрцитиметрическим способом // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2003. — № 2. — С. 20.
  21. *Evaluation of residual stresses and plastic deformation for iron-based materials by leakage magnetic flux sensors / K. Masatoshi, Y. Shinsuke, Yamada Koji, I. Yoshihiro // J. Alloys and Compounds.* — 2001. — **314**, № 1-2. — Р. 232.
  22. *Горкунов Е. С., Хамитов В. А., Бартнев О. А.* Магнитоакустическая эмиссия в пластически деформированных ферромагнетиках // Дефектоскопия. — 1988. — № 9. — С. 10.
  23. *Akira M., Sinichi I., Kaoru S.* The basic study of the detection of metal fatigue by laser instituted thermal vibration (докл.) // Conf. on Engineering Thin Films with Ion Beam Nanoscale Diagnostics and Molecular Manufacturing, San Diego, Calif. 30–31 July 2001, Proc. SPIE2001, 4468. — Р. 171–178.
  24. *Бусов В. Л.* Об акустическом аналоге кривой роста усталостных трещин // Дефектоскопия. — 2008. — № 9. — С. 85.
  25. *Богданов Дж., Козин Ф.* Вероятностные модели накопления повреждений. — М.: Мир, 1989. — 340 с.
  26. *Бусов В. Л.* О соотношении вкладов составляющих деформирующего напряжения для фрагментированных поликристаллов // Физика и техника высоких давлений. — 2004. — **14**, № 1. — С. 62.
  27. *Иванова В. С.* Синергетика разрушения и механические свойства // Синергетика и усталостное разрушение металлов. — М.: Наука, 1989. — С. 6.
  28. *Глезер А. М., Метлов Л. С.* Мегапластическая деформация твердых тел // Физика и техника высоких давлений. — 2008. — **18**, № 4. — С. 21.
  29. *Абрамов В. С., Бусов В. Л., Заика В. Н.* О неразрушающем акустическом методе оценки остаточных напряжений в закаленном слое // Дефектоскопия. — 2008.
  30. *Бусов В. Л.* Акустический метод обратного рассеяния в опытах под нагрузкой и перспективы его развития // Физика и техника высоких давлений. — 2003. — **13**, № 1. — С. 145.
  31. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Статистическая физика. — Ч. 1. Т. 5. — М.: Наука, 1976. — 583 с.
  32. *Хоникомб Р.* Пластическая деформация металлов. — М.: Мир, 1972. — С. 103.
  33. *Спосіб визначення границі витривалості / Бусов В. Л., Шишкин И. В., Иофин И. Д.* // Заявка на патент № 2009 10772 от 26.10.2009 G 01 N 3/34; G 01 N 29/44.
  34. *Дэлли Д., Райли У.* Тензодатчики. Экспериментальная механика. — В 2-х кн. Кн. 1. / Под ред. А. Кобаяси. — М.: Мир, 1990. — С. 54.
  35. *Таблицы физических величин.* Справ. / Под ред. И. К. Кикоина. — М.: Атомиздат, 1976. — С. 48.
  36. *Механические свойства материалов под давлением / Под ред. Х. Л. Хью.* — Вып. 2. Применение высоких давлений в технологических процессах. — М.: Мир, 1973. — 375 с.

Донбас. гос. машиностроит. акад.,  
Краматорск

Поступила в редакцию  
12.10.2009

## **ДЕВ'ЯТА МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ «ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ»**

**відбудеться 27–28 квітня 2010 р.  
в Національному технічному університеті України  
«Київський політехнічний інститут»**

*Кафедра ПРИЛАДІВ ТА СИСТЕМ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ приладобудівного факультету НТУУ «КПІ» запрошує вчених, виробничі та сервісні компанії, які працюють в усіх галузях приладобудування, взяти участь у роботі конференції. Метою конференції є обмін досвідом фахівців з питань прецизійних технологій та нових рішень у приладобудуванні, зустрічі з керівниками провідних підприємств, формування спільних проектів, пошук партнерів для співпраці, формування інноваційних пропозицій.*

### **Конференція буде проводитися за такими напрямками:**

1. Теорія та практика навігаційних приладів і систем, систем керування та діагностики.
2. Оптичні та оптико-електронні прилади і системи.
3. Процеси виготовлення приладів, методи і засоби їх контролю.
4. Інформаційні технології, теорія проектування систем вимірювання механічних величин, мікро- і нанопристроїв.
5. Аналітичне та екологічне приладобудування.
6. Біомедичне приладобудування та технології.
7. Неруйнівний контроль, технічна та медична діагностика.
8. Прилади і системи обліку витрат енергоносіїв.

*29 квітня 2010 р. відбудеться III Всеукраїнська науково-технічна конференція студентів та аспірантів «Погляд у майбутнє приладобудування». Запрошуємо всіх бажаних взяти участь у роботі конференції.*

### **Адреса оргкомітету:**

Кафедра ПРИЛАДІВ ТА СИСТЕМ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ приладобудівного факультету  
Національного технічного університету України «КПІ»  
03056, Київ, пр. Перемоги 37, приладобудівний ф-т, каф. ПСНК  
тел: (044) 454-95-47, 454-95-48, e-mail: psnk@ntu-kpi.kiev.ua

## МЕТОДЫ НИЗКОЧАСТОТНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ С СУХИМ КОНТАКТОМ В СИСТЕМЕ «ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ–ИЗДЕЛИЕ»

А. И. БОНДАРЕНКО

*Выполнен анализ методов низкочастотной акустической дефектоскопии с сухим контактом в системе «преобразователь–изделие» при неразрушающем контроле крупноструктурных неметаллических конструкций, многослойных конструкций из металлических и неметаллических материалов и протяженных металлических конструкций. Рассмотрены виды сухого контакта при контроле многослойных конструкций и протяженных трубопроводных систем.*

*Analysis of the methods of low-frequency acoustic flaw detection with dry contract in Ytransducer-itemΦ system in non-destructive testing of large-sized nonmetallic structures, multilayer structures from metal and non-metal materials and extended metal structures has been performed. Kinds of dry contact in testing multilayer structures and extended pipeline systems are considered.*

В современной акустической дефектоскопии используется большое количество методов неразрушающего контроля (НК), основанных на применении упругих колебаний и волн независимо от частоты (от низких частот до десятков МГц), возбуждаемых или возникающих в объектах контроля [1]. Особое место среди этих методов занимают низкочастотные акустические методы НК, которые объединяют:

— использование упругих колебаний звуковых и низких УЗ частот (до 100...150 кГц);

— сухой акустический контакт колеблющейся поверхности электроакустического преобразователя (ЭАП) с поверхностью объекта контроля без применения дополнительных смачивающих материалов в системе «преобразователь–изделие» [1].

В связи с этим низкочастотные акустические методы отличаются от традиционных УЗ методов НК физическими принципами и эксплуатационными возможностями. Сюда относится прежде всего сухой акустический контакт, обеспечивающий соединение между электроакустическим и акустическим трактами дефектоскопа, т. е. соединение рабочей поверхности ЭАП с поверхностью объекта контроля для передачи акустической энергии между ними в системе «преобразователь–изделие».

В настоящее время в низкочастотной дефектоскопии сухой контакт в системе «преобразователь–изделие» осуществляется двумя способами: без применения и с применением дополнительной постоянной статической силы прижатия преобразователя к поверхности контролируемого изделия.

Рассмотрим особенности применения способов сухого контакта в системе «преобразователь–

изделие» для НК изделий различного назначения методами низкочастотной дефектоскопии.

**Способ сухого контакта без применения дополнительной силы в системе «преобразователь–изделие».** Способ сухого контакта в системе «преобразователь–изделие» без применения дополнительной статической силы нашел распространение в низкочастотной дефектоскопии в связи с необходимостью решения задач по обнаружению несплошностей (трещин, полостей, степени сцепления) в крупноструктурных конструкциях из неметаллических материалов с грубой и пористой поверхностью (бетон, железобетон, гранит, капрон, другие неметаллические конструкции). НК таких конструкций проводится с использованием низкочастотных методов прохождения при их сквозном или поверхностном прозвучивании, основанных на излучении и приеме волн, однократно прошедших через объект контроля в любом направлении, и анализе их параметров [1]. Ввод низкочастотных волн в точку контакта, который называется точечным акустическим контактом, осуществляется различными точечными инструментами. Так, для контроля бетонных конструкций в системе «преобразователь–изделие» используются низкочастотные преобразователи с полуволновыми экспоненциальными концентраторами, которые являются резонансными элементами, собирающими колебания преобразователя достаточно большой апертуры в точку контакта [2]. При контроле таких конструкций определяется скорость продольной волны при сквозном прозвучивании объекта контроля или при поверхностном прозвучивании на постоянной базе между преобразователями. В этом случае оптимальным является расстояние на базе  $l = 11...13$  см. По результатам определения скорости прозвучивания



делается косвенная оценка прочности бетона и других физико-механических и структурных свойств разных строительных материалов.

В работе [3] для ввода ультразвуковых колебаний в контролируемую крупноструктурную конструкцию используется металлический резонансный концентратор в виде конуса, вершина которого колеблется вдоль продольной оси. Ультразвуковые преобразователи представляют собой поршневой пьезоэлемент, установленный на концентратор. Такие преобразователи генерируют импульсы в несколько периодов колебаний, которые возбуждают в контролируемом объекте продольные ультразвуковые волны. В результате измеряется скорость прохождения волн через материал объекта контроля, на основании чего оцениваются физико-механические свойства материала (бетона).

Более совершенные ультразвуковые низкочастотные преобразователи с сухим точечным контактом для контроля крупноструктурных конструкций предложены в работах [4, 5]. Преобразователи содержат контактные нерезонансные наконечники (протекторы) с конической или клиновидной поверхностью, которые отличаются от преобразователей с концентраторами следующими особенностями: протектор в точке контакта

имеет размеры, намного меньше длины волны; демпфер преобразователя выполнен с жидкого композитного материала с большим затуханием ультразвука и окружает всю свободную поверхность вокруг пьезоэлемента. Преобразователь генерирует импульсы малой длительности, которые возбуждают в объекте контроля продольные или поперечные волны. На поверхность объекта контроля преобразователь действует как сосредоточенная колебательная сила  $F = F_m \cos \omega t$ , где  $F_m$  — амплитуда переменной колебательной силы;  $\omega$  — круговая частота возбуждаемого сигнала;  $t$  — время. Применение таких преобразователей открыло на практике возможность использования низкочастотных ультразвуковых волн для контроля крупноструктурных конструкций посредством их сквозного или поверхностного прозвучивания на заданной базе. На рис. 1 приведена упрощенная классификация методов низкочастотной дефектоскопии крупноструктурных конструкций на основе сухого контакта преобразователя с поверхностью контролируемого изделия.

**Способ сухого контакта с использованием дополнительной постоянной силы прижатия в системе «преобразователь–изделие».** Способ сухого акустического контакта в системе «преобра-

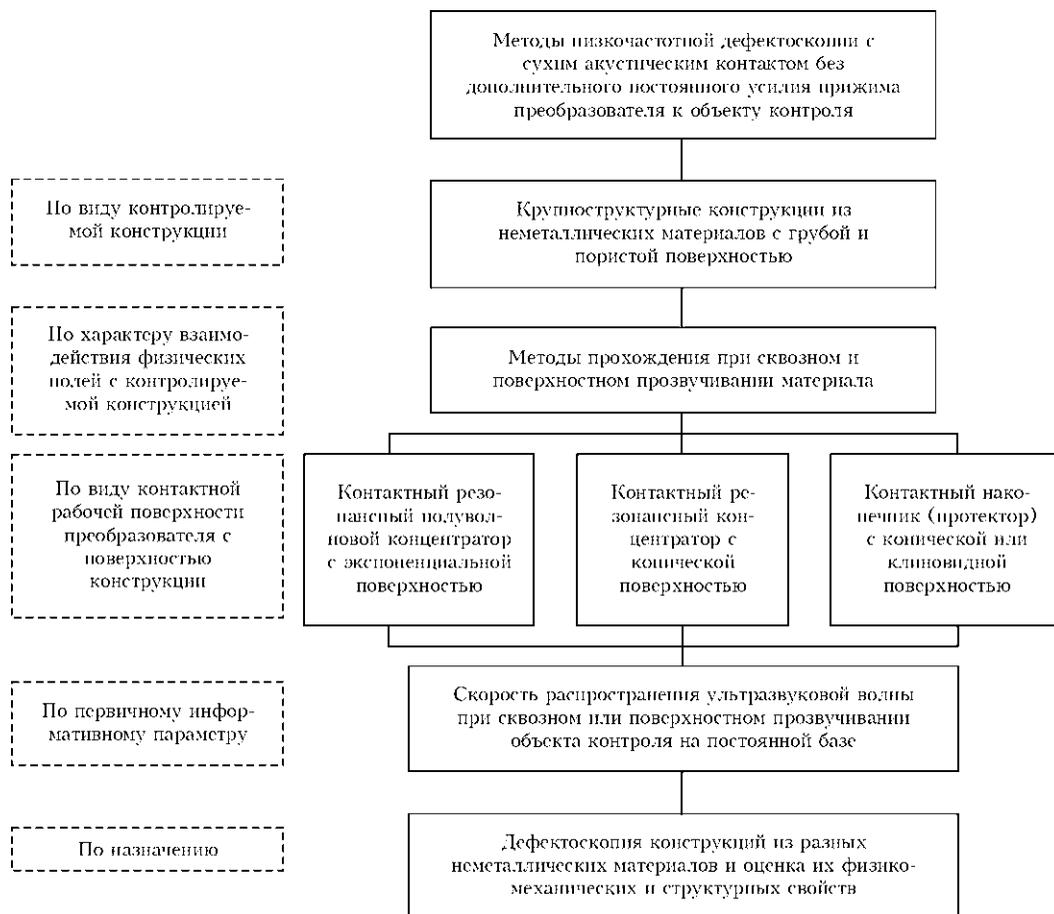


Рис. 1. Упрощенная классификация методов низкочастотной дефектоскопии крупноструктурных конструкций на основе сухого контакта



зователь–изделие» с использованием постоянной статической силы для прижатия преобразователя к поверхности получил значительное распространение в низкочастотной дефектоскопии в связи с необходимостью решения задач по обнаружению несплошностей (дефектов соединения и расслоений между элементами) в клеевых, паяных и других многослойных конструкциях, выполненных из различных металлических и неметаллических материалов (слоистые пластики, сотовые панели, лопасти вертолетов, соединения обшивок с элементами жесткости, другие изделия авиакосмической техники) [6]. При контроле таких многослойных конструкций используется сухой точечный контакт (СТК), который осуществляется в основном через выпуклую поверхность преобразователя, имеющего двойную кривизну [1].

На основе сухого точечного контакта в системе «преобразователь–изделие» для контроля многослойных конструкций разработано ряд низкочастотных методов акустической дефектоскопии, к которым можно отнести импедансный, велосиметрический, акустико-топографический и другие акустические методы. Низкочастотный акустический импедансный метод дефектоскопии с сухим точечным контактом впервые был теоретически обоснован и получил практическое применение в конце 1950-х годов в России в связи с необходимостью решения задач контроля качества и однородности склейки изделий из разнородных материалов [7, 8]. Теоретические основы физических принципов и прикладные аспекты различных вариантов импедансного метода дефектоскопии многослойных конструкций с СТК, его практическое воплощение в разных типах дефектоскопических приборов, отличающихся применяемыми преобразователями, характером излучения и способами обработки сигналов, нашли отражение в многочисленных статьях [9–14], обобщены в монографии [15], а также изложены в справочниках [6, 16, 17]. Для контроля многослойных конструкций в основном используется импедансный метод, основанный на возбуждении в объектах контроля изгибных упругих волн звуковых (реже низких ультразвуковых) частот и регистрации изменений механических импедансов, обусловленных дефектами соединений между слоями контролируемой конструкции [15]. В данном случае механический импеданс является параметром контролируемой многослойной конструкции [6]. Импедансный метод с сухим точечным контактом позволяет контролировать многослойные конструкции в различных сочетаниях материалов, отличающиеся по своим физико-механическим свойствам [6]. Импедансный метод в основном использует совмещенный стержневой преобразователь, в корпусе которого располагаются излучающий и приемный пьезоэлементы. При контроле осуществляется пе-

ремещение преобразователя по поверхности многослойной конструкции. Прижим контактного наконечника преобразователя проводится с помощью статической постоянной силы  $F_0$ . В качестве информативных параметров, по которым определяют величину изменения механического импеданса конструкции, используют изменение амплитуды, частоты или фазы отраженного сигнала.

Для контроля многослойных конструкций получил распространение также велосиметрический метод, основанный на прохождении упругих волн при сквозном или поверхностном прозвучивании материала изделия [15]. Метод использует раздельно-совмещенные преобразователи с СТК при одностороннем или двустороннем доступе к поверхности контролируемого объекта. В качестве информативных параметров, по которым определяют дефекты в зоне контакта, используют фазу или время прохождения упругих волн ультразвукового диапазона по контролируемому изделию.

Способ сухого контакта в системе «преобразователь–изделие» с использованием статической постоянной силы прижатия преобразователя к поверхности контролируемого изделия с середины 1990-х годов начал использоваться в методе дальнедействующего ультразвукового контроля низкочастотными направленными волнами для оценки технического состояния протяженных металлических инженерных конструкций [18]. Такие протяженные конструкции представляют собой волноводы, в которых распространяется плоская ультразвуковая низкочастотная волна. Метод контроля направленными волнами позволяет выявлять несплошности (дефекты коррозии и эрозионного износа стенки трубы, дефекты сварных соединений) в протяженных трубопроводных системах, трубах теплообменников, дефекты других протяженных металлических инженерных конструкций (рельсы, канаты вантовых мостов и др. конструкций). Этот метод можно отнести к импедансным, так как выявление несплошностей в трубопроводах основывается на оценке изменения механического импеданса контролируемой среды вследствие изменения поперечного сечения стенки трубы. Метод основан на возбуждении в трубопроводе упругих колебаний в виде кольцевой направленной ультразвуковой волны, которая взаимодействует с несплошностями стенки трубы. Для этого используется кольцо размещенных равномерно по диаметру трубы преобразователей, содержащих пьезоэлементы, которые одновременно излучают упругие колебания и принимают отраженные сигналы от несплошностей. В качестве информативного параметра служит амплитуда отраженного сигнала от несплошностей. Основные особенности применения метода дальнедействующего низкочастотного ультразвукового контроля протяженных объектов приведены в работе [19].



На рис. 2 приведена упрощенная классификация методов низкочастотной дефектоскопии многослойных конструкций из металлических и неметаллических материалов и протяженных трубопроводных систем, для контроля которых в системе «преобразователь–изделие» используется сухой контакт и постоянная сила прижатия преобразователей к поверхности контролируемых изделий. Постоянная сила  $F_0$  должна обеспечить на-

дежную передачу акустической энергии как при возбуждении колебаний в объекте контроля, так и при приеме колебаний, отраженных от несплошностей. Так как в системе «преобразователь–изделие» будет действовать также переменная сила  $F_m$ , обусловленная колебаниями преобразователя при излучении упругих колебаний и изделия при приеме отраженных колебаний, то общая сила в зоне контакта будет  $F = F_0 + F_m \cos \omega t$ . Ниже рас-

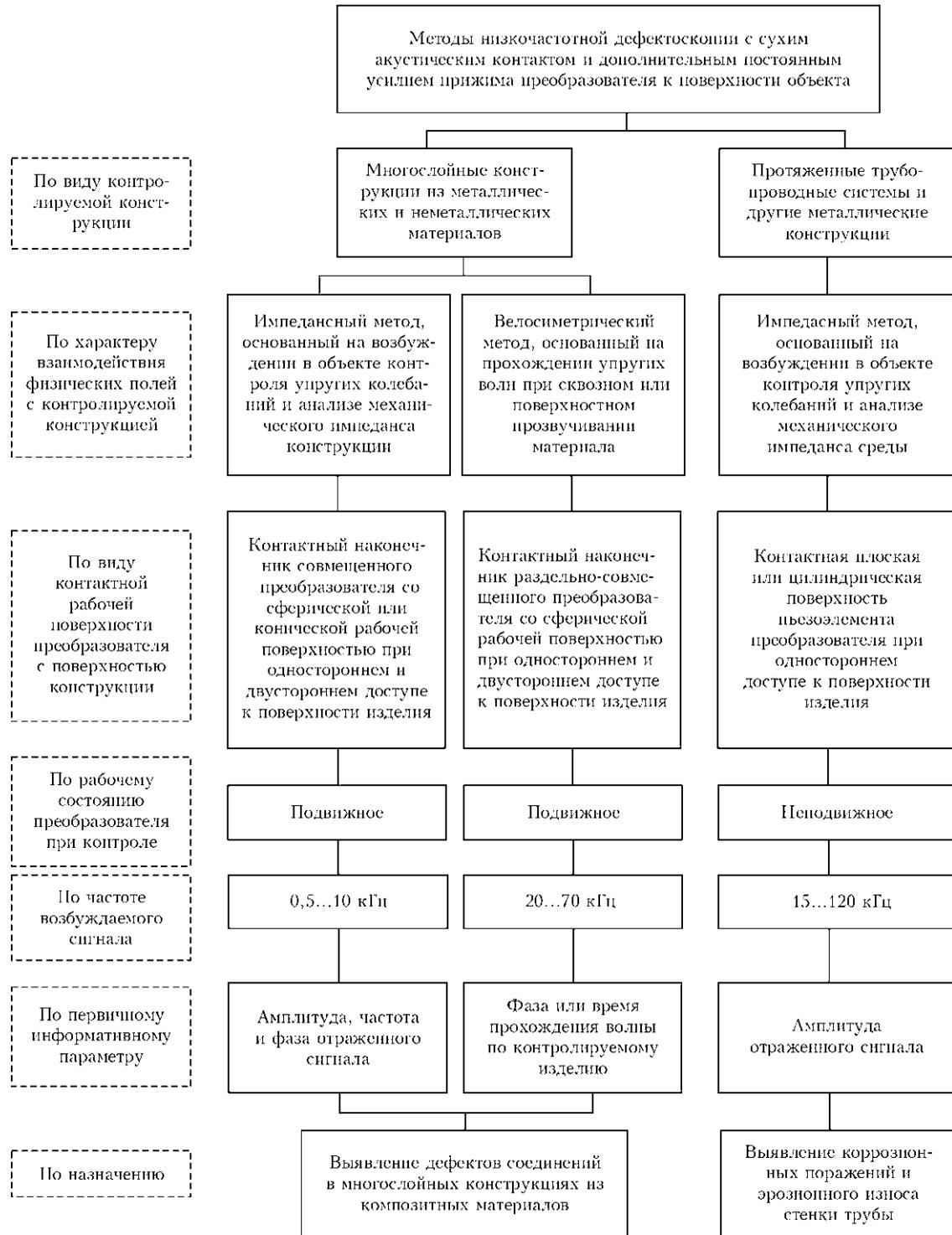


Рис. 2. Упрощенная классификация методов низкочастотной дефектоскопии конструкций с дополнительным усилием прижатия



смотрены основные виды и отличительные особенности сухого контакта в системе «преобразователь–изделие» при контроле упомянутых конструкций импедансными методами низкочастотной дефектоскопии.

**Виды сухого контакта в системе «преобразователь–многослойная конструкция».** При анализе свойств сухого контакта в процессе контроля многослойных конструкций будем рассматривать наиболее распространенный импедансный метод дефектоскопии с использованием совмещенных преобразователей, содержащих разделенные волноводом излучающий и приемный пьезоэлементы [6]. Излучающий элемент возбуждает гармонические упругие колебания, которые через СТК в системе «преобразователь–многослойная конструкция» преобразуются в гармонические изгибные колебания контролируемой конструкции. Преобразователь контактирует с контролируемой конструкцией через износостойкий контактный наконечник с выпуклой сферической или конической с острым концом рабочей поверхностью [13]. На рис. 3 приведены виды контактов преобразователей с поверхностью многослойной конструкции.

Рабочая зона поверхности контактного наконечника, которая контактирует с поверхностью изделия, должна быть во много раз меньше длины низкочастотной ультразвуковой волны в материале объекта контроля. Достигаются такие малые размеры контактной зоны при контроле многослойных конструкций за счет использования сферической выпуклой поверхности преобразователя, радиус кривизны которого составляет порядка  $R = 3...25$  мм. Площадь зоны контакта при этом соответствует долям квадратного миллиметра. Зона контакта сферического наконечника с контролируемой многослойной конструкцией зависит от формы последней. При контакте сферического наконечника с плоским изделием или в виде сферы (рис. 3, а) зона контакта ограничена окружностью, а при контакте с образующей цилиндра (рис. 3, б) — эллипсом.

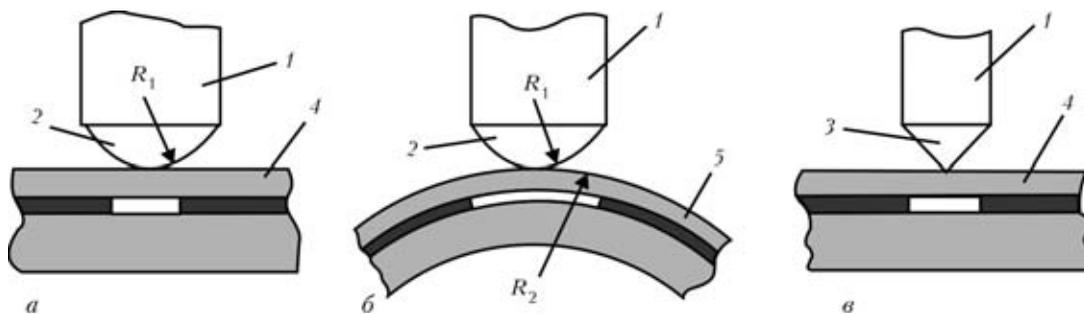


Рис. 3. Виды контакта в системе «преобразователь–многослойная конструкция»: 1 — преобразователь; 2, 3 — контактный наконечник соответственно со сферической рабочей поверхностью и с острым концом; 4 — плоское контролируемое изделие; 5 — контролируемое изделие в форме цилиндра;  $R_1$  — радиус контактного наконечника;  $R_2$  — радиус изделия в форме цилиндра

**Виды сухого контакта в системе «преобразователь–трубопровод».** При анализе особенностей и свойств сухого контакта при контроле протяженных трубопроводов будем рассматривать метод дальнего действия низкочастотного ультразвукового контроля с использованием совмещенных преобразователей с одним пьезоэлементом. Этот пьезоэлемент предназначен для возбуждения импульсных упругих продольных или поперечных колебаний, которые через сухой контакт в системе «преобразователь–трубопровод» формируют в стенке трубы направленные волны соответственно продольной и крутильной мод [19]. Прием отраженных сигналов от несплошностей в трубопроводе осуществляется тем же пьезоэлементом преобразователя. На рис. 4 приведены виды контакта в системе «преобразователь–трубопровод».

Сухой контакт преобразователя с поверхностью трубы (рис. 4, а) осуществляется непосредственно поверхностью пьезоэлемента [20] и происходит по образующей трубы на длине  $l = 12$  мм (рис. 4, в). Ширина пьезоэлемента  $a = 3$  мм, толщина  $h = 2$  мм. Площадь рабочей зоны контакта зависит от диаметра трубы и может составлять единицы или десятки миллиметров. Пьезоэлемент по ширине защищен двумя алюминиевыми пластинами толщиной около 1 мм. Корпус преобразователя выполнен из нержавеющей стали. Преобразователь заполнен демпфирующим материалом с большим коэффициентом затухания, что позволяет уменьшить резонансную частоту пьезоэлемента с 2 МГц до 40 кГц. С помощью пьезоэлемента возбуждаются колебания поперечных волн по раскрытию пьезоэлемента на 12 мм, которые направлены по внешней окружности трубы. Колебания поперечных волн преобразуются в крутильную волну моды  $T(0,1)$  нулевого порядка и распространяются по сечению трубы. Сухой контакт поверхности аналогичных пьезопреобразователей с поверхностью трубы используется в системе Teletest, представляющей собой технологию дистанционного ультразвукового контроля низкочастотными направленными волнами тру-

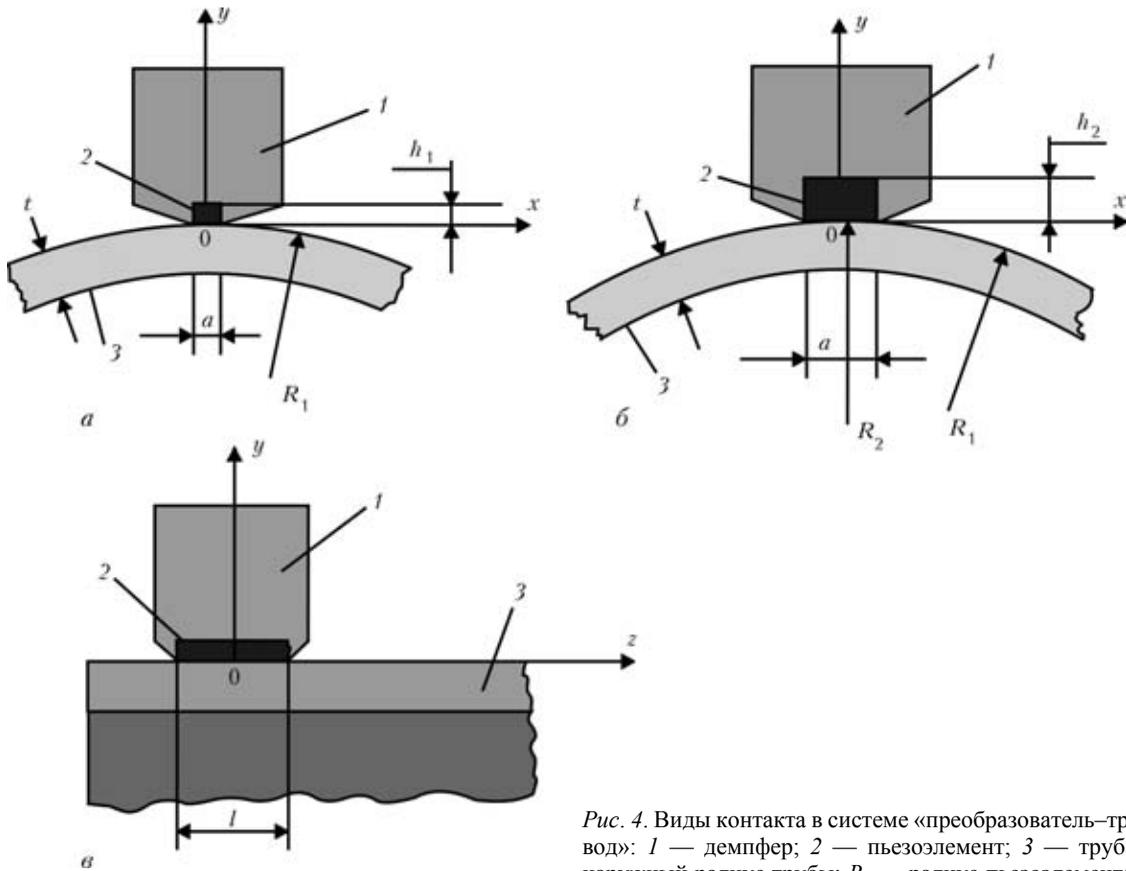


Рис. 4. Виды контакта в системе «преобразователь–трубопровод»: 1 — демпфер; 2 — пьезоэлемент; 3 — труба;  $R_1$  — наружный радиус трубы;  $R_2$  — радиус пьезоэлемента

бопроводов преимущественно в нефтегазовой и химической промышленности [21]. В системе Wavemaker G3, предназначенной также для диагностики технического состояния трубопроводов, сухой контакт поверхности пьезоэлемента с трубой происходит по образующей трубы на длине  $l = 13$  мм [22].

Новый тип преобразователя (рис. 4, б) предложен в работе [23]. Сухой контакт в системе «преобразователь–труба» осуществляется по образующей трубы непосредственно плоскостью пьезоэлемента на длине  $l = 12,5$  мм (рис. 4, в). При этом пьезоэлемент проходит предварительную обработку для получения определенной выпуклой формы, соответствующей внешней поверхности трубы. Ширина пьезоэлемента  $a = 8$  мм, толщина  $h = 4,5$  мм. Площадь рабочей зоны контакта при этом может составлять несколько десятков квадратных миллиметров.

Пьезоэлемент содержит верхнюю и нижнюю пьезопластины, которые поляризованы по направлению толщины пьезоэлемента, т. е. по направлению вдоль окружности трубы. При подаче возбуждающего сигнала верхняя и нижняя пьезопластины вибрируют в противоположном направлении, в результате чего возникает деформация сдвига по направлению вдоль окружности трубы и возбуждается направленная волна крутильной моды  $T(0,1)$ .

Вид зоны контакта рассмотренных преобразователей с поверхностью трубы зависит от формы контактной поверхности преобразователей. Приведенную на рис. 4, а схему контакта преобразователя с поверхностью трубы следует рассматривать как контакт плоскости пьезоэлемента с цилиндрической поверхностью трубы радиуса  $R_1$ . В этом случае зона контакта будет представлять эллипс, вытянутый вдоль образующей трубы в виде полосы, ограниченной параллельными прямыми. Вид контакта пьезопреобразователя с поверхностью трубы (рис. 4, б) представляет собой контакт двух цилиндрических поверхностей с радиусами  $R_1$  и  $R_2$ , (радиус  $R_2$  имеет отрицательное значение). В этом случае зона контакта будет эллипсоидом, также вытянутым вдоль образующей трубы.

### Выводы

1. Методы низкочастотной акустической дефектоскопии с сухим контактом в системе «преобразователь–изделие» занимают свой достаточно важный сектор в неразрушающем контроле различных объектов ультразвуковыми методами.

2. Наибольшее распространение в низкочастотной дефектоскопии получили импедансные методы, основанные на анализе изменения механических импедансов изделий при контроле многослойных конструкций из металлических и не-



металлических материалов и механических импедансов среды при контроле протяженных металлических трубопроводных систем.

3. Сухой контакт в системе «преобразователь–изделие» в импедансных методах низкочастотной дефектоскопии обеспечивается с помощью постоянной статической силы прижима преобразователя к поверхности объекта контроля.

1. ГОСТ 23829–85. Контроль неразрушающий акустический. Термины и определения. — М.: Изд-во стандартов, 1986. — 15 с.
2. Дзенис В. В. Применение ультразвуковых преобразователей с точечным контактом для неразрушающего контроля // Дефектоскопия. — 1992. — № 8. — С. 49–51.
3. Глухов Н. А. Точечные источники ультразвука как инструмент контроля физико-механических свойств материалов // Дефектоскопия. — 1992. — № 8. — С. 49–51.
4. Шевалдыкин В. Г., Самокрутов В. В., Козлов В. Н. Новые аппаратно-методические возможности ультразвукового прозвучивания композитов и пластмасс // Зав. лаб. — 1998. — № 4. — С. 29–39.
5. Шевалдыкин В. Г., Самокрутов В. В., Козлов В. Н. Ультразвуковые низкочастотные преобразователи с сухим точечным контактом и их применение для неразрушающего контроля // Контроль. Диагностика. — 2003. — № 2. — С. 30–39.
6. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / В. В. Клюев, Ф. Р. Соснин, В. Н. Филипов и др.; Под ред. В. В. Клюева. — М.: Машиностроение, 1995. — 448 с.
7. А. с. № 126653 СССР, G01N, 29/16. Устройство для контроля качества и однородности склейки изделий / Ю. В. Ланге, А. В. Римский-Корсаков // Открытия. Изобретения. — 1960. № 5.
8. Ланге Ю. В. Новый акустический метод дефектоскопии и некоторые результаты его применения // Приборостроение. — 1959. — № 6. — С. 23–25.
9. Ланге Ю. В. Некоторые особенности акустического импедансного метода дефектоскопии // Дефектоскопия. — 1965. — № 1. — С. 44–53.
10. Ланге Ю. В. О характеристиках импедансного метода дефектоскопии // Там же. — 1972. — № 1. — С. 57–66.
11. Ланге Ю. В. Импедансный метод: варианты, способы обработки информации, режимы настройки аппаратуры // Там же. — 1979. — № 1. — С. 5–14.
12. Ланге Ю. В. Акустический импедансный метод неразрушающего контроля многослойных конструкций. Состояние и перспективы развития // Приборы и системы управления. — 1988. — № 5. — С. 16–18.
13. Ланге Ю. В. Акустические импедансные методы неразрушающего контроля // Дефектоскопия. — 1990. — № 8. — С. 3–19.
14. Ланге Ю. В. Низкочастотные акустические методы и средства неразрушающего контроля многослойных конструкций // Контроль. Диагностика. — 2004. — № 2. — С. 39–41.
15. Ланге Ю. В. Акустические низкочастотные методы и средства неразрушающего контроля многослойных конструкций. — М.: Машиностроение, 1991. — 272 с.
16. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Справ. / Под ред. В. В. Клюева. Кн. 2. — М.: Машиностроение, 1986. — 352 с.
17. Неразрушающий контроль и диагностика. Справ. / Под ред. В. В. Клюева. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 2003. — С. 259–276.
18. Mudge P. J., Lank A. M., Allyn D. N. A long range method of the detection of corrosion under insulation in process pipework. — Thermie Project: OG474/94, 5 th European Union Hydrocarbons Symposium, Edinburg, 26–28 Nov., 1996.
19. Патон Б. Е., Троицкий В. А., Бондаренко А. И. Метод низкочастотного ультразвукового контроля протяженных объектов направленными волнами // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2008. — № 2. — С. 20–30.
20. Kameyama S., Misu K., Wadaka S. Ultrasonic Test Instrument Using Guided Wave // Hihakai Kenza. — 2003. — 52, № 12. — С. 672–678.
21. Teletest Long Range Ultrasonic Test System. Section 1. System Overview and Principles of Operation. — Sept., 2004. — 6 с.
22. Система Wavemaker G3 — новейшая технология диагностики трубопроводов. — Проспект компании Guided Ultrasonics. — 2 с.
23. A new type transducer for torsional guided wave generation and its application to defect detection in pipes / L. Zenghua, W. Bin, H. Cunfu et al. // Insight. — 2007. — 49, № 1. — P. 41–43.

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

Поступила в редакцию  
25.09.2009

## ПЯТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах»

Украина, Крым, поселок Качивели, 28-25 мая 2010 г.



### Организаторы

Национальная академия наук Украины  
Институт электросварки им. Е. О. Патона НАНУ  
Международная ассоциация «Сварка»  
Местный благотворительный фонд «Содружество  
сварщиков»

### Оргкомитет

Украина, 03680, г. Киев, ул. Боженко 11  
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ  
Тел./факс: (38044) 529-26-23, 271-26-33  
E-mail: d34@paton.kiev.ua, journal@paton.kiev.ua



# СОВМЕЩЕНИЕ ДИСКРЕТНЫХ КРИВЫХ В ЗАДАЧЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ

В. А. КОЛЯДА, Е. В. ШАПОВАЛОВ

*Предложена двухшаговая процедура совмещения дискретных кривых, предназначенная для решения проблемы сравнения измеренного профиля рельса с эталоном при бесконтактном автоматизированном контроле геометрических параметров железнодорожных рельсов. Разработанная процедура позволяет выполнять обработку результатов сканирования профилей рельсов в масштабе реального времени.*

*A two-step procedure is proposed for superposition of discrete curves designed for solving the problem of comparison of the measured rail profile with the standard at contactless automated control of geometrical parameters of railway rails. Developed procedure allows processing the results of scanning the rail profile in real-time.*

Одним из основных направлений развития средств диагностики железнодорожных путей является повышение достоверности контроля за счет внедрения новых технических средств автоматизированного контроля и документирования результатов компьютеризированными комплексами. Среди новых технических средств, которые в последнее время активно внедряются в зарубежные диагностические комплексы, широкое распространение получили системы контроля геометрических параметров рельсов, основанные на средствах технического зрения. Основным преимуществом таких систем является бесконтактность, значительное количество контролируемых параметров, возможность контроля при высоких скоростях движения путеизмерительных поездов.

Общий принцип работы систем бесконтактного контроля геометрических параметров рельсов основан на методе лазерной триангуляции. С помощью лазерных лучей, развернутых в плоскость, на поверхности рельса формируется световой след. Две видеокамеры, расположенные под некоторыми триангуляционными углами к плоскости лазерного излучения, регистрируют участки светового следа, находящиеся по разные стороны рельса. На этапе обработки видеозображений формируются массивы дискретных точек, которые соответствуют криволинейным сегментам поперечного профиля рельса. Для решения задачи контроля геометрических параметров рельса необходимо сравнивать измеренный профиль рельса с некоторой моделью, в качестве которой используется фиксированный массив дискретных точек, сформированный на основании чертежа эталонного рельсового профиля. В общем случае измеренный профиль рельса может быть ориентирован относительно эталонного профиля случайным об-

разом, как, например, показано на рис. 1. Случайная ориентация измеренного профиля объясняется тем, что сенсорные блоки, которые выполняют лазерно-телевизионное сканирование рельсов, подвержены различным колебаниям и вибрациям в процессе движения путеизмерительного поезда. Кроме того, количество точек в измеренном профиле также непостоянно, что обусловлено изменениями ориентации светового следа на видеоизображениях и влиянием различных механических и оптических помех. Таким образом, для сравнения измеренного профиля с эталоном необходимо наилучшим образом совместить две дискретные кривые, одна из которых имеет случайную ориентацию и произвольное количество элементов.

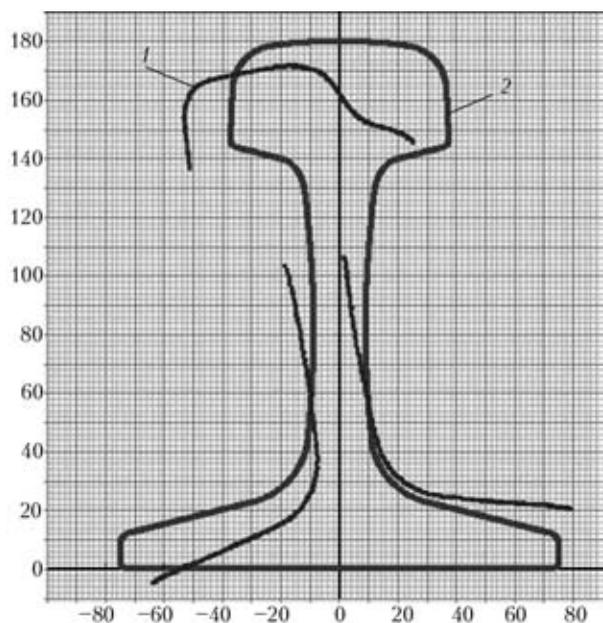


Рис. 1. Пример взаимного положения измеренного (1) и эталонного (2) профилей рельса



Постановку задачи совмещения дискретных кривых, соответствующих измеренному и эталонному профилям рельса, можно представить следующим образом. Пусть  $\{\mathbf{d}_i\}_{i=1}^{N_d}$  и  $\{\mathbf{m}_j\}_{j=1}^{N_m}$  — соответственно массивы дискретных точек данных (измеренного профиля) и модели (эталонного профиля). Необходимо найти такое преобразование  $T$ , при котором достигается наилучшее совпадение данных с моделью. Параметры преобразования  $T$  задаются в виде вектора  $\mathbf{a}$ . Вид вектора параметров  $\mathbf{a}$  зависит от типа преобразования, которому подвергаются данные по отношению к модели в конкретной задаче. Мера приближения данных к модели определяется функцией ошибки  $\varepsilon^2(\mathbf{x}) = \|\mathbf{x}\|^2$ . Пары сопряженных точек из массивов данных и модели задаются функцией соответствия  $\varphi(i)$ . Также вводится функция весов  $w_i$ , которая равна единице, если  $\varphi(i) = j$ , и равна нулю во всех остальных случаях. Отсюда задачу минимизации ошибки совмещения данных с моделью можно записать в виде:

$$E(\mathbf{a}, \varphi) = \sum_{i=1}^{N_d} w_i \min_{\varphi(i)} \varepsilon^2(|\mathbf{m}_{\varphi(i)} - T(\mathbf{a}; \mathbf{d}_i)|). \quad (1)$$

Конечная оценка оптимального преобразования, которое обеспечивает наилучшее совпадение данных с моделью, определяется по формуле:

$$\hat{\mathbf{a}} = \operatorname{argmin}_{\mathbf{a}} \sum_{i=1}^{N_d} w_i \min_{\varphi(i)} \varepsilon^2(|\mathbf{m}_{\varphi(i)} - T(\mathbf{a}; \mathbf{d}_i)|). \quad (2)$$

Выражения (1), (2) представляют собой общую постановку задачи совмещения дискретных кривых.

В ходе анализа и практического тестирования методов совмещения дискретных кривых установлено, что для совмещения профилей рельсов наиболее целесообразно использовать метод ИСР (Iterated Closest Point), который базируется на итеративном приближении точек совмещаемых кривых [1]. В отличие от методов совмещения, представленных в публикациях [2, 3], которые основаны на отличительных признаках или инвариантах, данный метод практически не чувствителен к форме совмещаемых кривых и изменению количества дискретных точек в массиве данных. При реализации метода ИСР в качестве сопряженных точек из массивов данных и модели выбираются пары, соответствующие так называемому расстоянию Хаусдорфа [4]. Расстоянием Хаусдорфа называется минимальное расстояние между точкой одного массива и всеми точками другого массива. Каждая итерация алгоритма, реализую-

щего метод ИСР, состоит из двух этапов. На первом этапе вычисляется функция соответствия  $\varphi$ :

$$\varphi(i) = \operatorname{argmin}_{j \in \{1, \dots, N_m\}} \varepsilon^2(|\mathbf{m}_j - T(\mathbf{a}_k; \mathbf{d}_i)|), \quad i = 1, \dots, N_d. \quad (3)$$

На втором этапе выполняется перерасчет вектора параметров преобразования  $\mathbf{a}$ :

$$\mathbf{a}_{k+1} = \operatorname{argmin}_{\mathbf{a}} \sum_{i=1}^{N_d} \varepsilon^2(|\mathbf{m}_{\varphi(i)} - T(\mathbf{a}; \mathbf{d}_i)|). \quad (4)$$

На практике для реализации второго этапа используются методы многомерной нелинейной оптимизации функции. Операции, выполняемые на первом и втором этапе, итеративно уменьшают ошибку. При этом алгоритм имеет гарантированную сходимость к некоторому локальному минимуму ошибки. Вместе с тем итеративное совмещение дискретных кривых представляет собой довольно ресурсоемкую процедуру, которую необходимо оптимизировать под конкретную задачу.

Для решения задачи совмещения дискретных кривых, соответствующих измеренному и эталонному профилям рельса, изначально необходимо определить вектор параметров преобразования  $\mathbf{a}$ . Измеренный профиль рельса всегда находится в плоскости  $XOY$  опорной системы координат (плоскости лазерного излучения), т. е. удаленность профиля относительно наблюдателя (видеокамеры) является постоянной величиной ( $t_z = \text{const}$ ). С другой стороны объект (рельс) может произвольным образом изменять свою ориентацию относительно плоскости  $XOY$ . В общем случае рельс может быть повернут вокруг осей  $OX$ ,  $OY$  и  $OZ$  опорной системы координат на углы  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  соответственно. Также профиль рельса может иметь линейные смещения  $t_x$  и  $t_y$  в плоскости  $XOY$ . Таким образом, в общем случае вектор параметров преобразования имеет следующий вид:  $\mathbf{a} = [\alpha \ \beta \ \gamma \ t_x \ t_y]$ . При этом связь между каждой точкой данных и соответствующей точкой модели определяется следующим преобразованием:

$$\begin{bmatrix} d_x \\ d_y \end{bmatrix} = \mathbf{R}(\alpha, \beta, \gamma) \begin{bmatrix} m_x \\ m_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где  $d_x, d_y$  — координаты точки массива данных  $\mathbf{d}$ ;  $m_x, m_y$  — координаты соответствующей точки массива модели  $\mathbf{m}$ ;  $\mathbf{R}(\alpha, \beta, \gamma)$  — общая матрица поворота вокруг трех осей опорной системы координат.

В формуле (5) представлено преобразование от модели к данным, где в качестве аргумента выступают координаты точек модели. Но в данном случае необходимо использовать обратное преобразование от данных (измеренного профиля) к мо-

дели (эталонному профилю), которое будет иметь следующий вид:

$$\begin{bmatrix} m_x \\ m_y \end{bmatrix} = \mathbf{R}^{-1}(\alpha, \beta, \gamma) \left( \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix} \right) \quad (6)$$

Тогда преобразование  $T$  запишется следующим образом:

$$\begin{aligned} T_5(\mathbf{a}; \mathbf{d}_i) &= T(\alpha, \beta, \gamma, t_x, t_y; \mathbf{d}_i) = \\ &= \mathbf{R}^{-1}(\alpha, \beta, \gamma) \left( \mathbf{d}_i - \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix} \right). \end{aligned} \quad (7)$$

На практике измеренный профиль формируется в виде отдельных массивов данных для левой и правой стороны рельса. В свою очередь каждый массив состоит из двух сегментов, соответствующих «головке» и «основанию» рельса. При этом сформированные массивы точек данных и модели имеют аналогичный порядок обхода профиля рельса. Эти практические предпосылки используются для повышения быстродействия процедуры, реализующей первый этап каждой итерации совмещения дискретных кривых согласно формуле (3). Для уменьшения вычислительных затрат, требуемых для расчета значений функции соответствия  $\phi$ , используются следующие два приема:

— для каждой точки из массива данных, принадлежащей конкретному сегменту «головки» или «ноги» рельса, поиск сопряженной точки выполняется только в пределах соответствующего сегмента модели;

— если для точки данных  $\mathbf{d}_i$  найдена сопряженная ей точка модели  $\mathbf{m}_j$ , то для точки  $\mathbf{d}_{i+1}$  поиск сопряженной точки в массиве модели начинается с элемента  $\mathbf{m}_{j+1}$ .

Такие несложные приемы позволяют существенно уменьшить количество вычислительных операций, необходимых для реализации первого этапа итеративной процедуры совмещения дискретных кривых, соответствующих измеренному и эталонному профилям рельса. При этом один из сегментов измеренного профиля, который в наибольшей степени подвержен износу, не участвует в расчете функции соответствия  $\phi$ .

Для реализации второго этапа итеративной процедуры совмещения в качестве метода многомерной нелинейной оптимизации функции выбран метод главных осей (Principal Axis Method), представленный в работе [5]. Основным преимуществом данного метода по сравнению с другими распространенными методами нелинейной оптимизации, такими как квазиьютоновские методы и метод Левенберга–Маркварда, является то обстоятельство, что в процессе поиска экстремума выполняется расчет только значения функции в точке и не требуется вычисление дополнительных параметров, таких как градиент или якобиан функ-

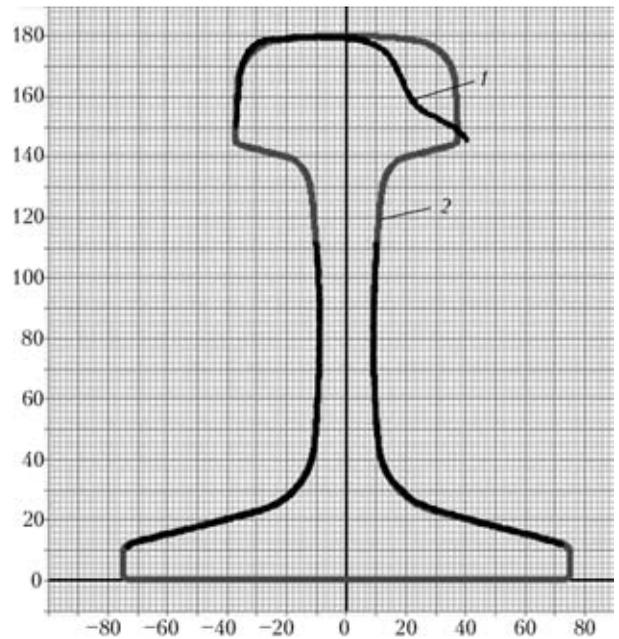


Рис. 2. Результаты совмещения измеренного (1) профиля рельса с эталоном (2) при использовании преобразования  $T_5$

кции. Также экспериментально установлено, что применительно к задаче совмещения дискретных кривых минимизация функции по методу главных осей выполняется в 2...3 раза быстрее, чем при использовании других методов.

После выполнения  $K$ -итераций алгоритма ИСР, представленного формулами (3), (4), полученные параметры  $\mathbf{a}_K$  используются для пересчета координат точек массива данных  $\mathbf{d}$  в соответствии с заданным преобразованием  $T$ .

На рис. 2 представлен результат совмещения измеренного профиля рельса с эталоном при использовании преобразования  $T_5$ , представленного выражением (7). Количество итераций фиксированное ( $K = 20$ ). Ошибка совмещения профилей  $\varepsilon \approx 0,15$  мм. Хотя в данном случае ошибка совмещения и составляет всего 0,08...0,1 % габаритных размеров профиля рельса, при этом процедура совмещения выполняется не совсем корректно. Измеренный профиль рельса просто масштабируется вдоль вертикальной оси до размеров эталона путем его поворота на угол  $\alpha$  вокруг оси  $OX$ . Однако на практике вертикальный размер (высота) измеренного профиля рельса зависит не только от углового параметра  $\alpha$ , но и от вертикального износа головки рельса  $h_B$ , что не учитывается при совмещении. Для решения данной проблемы разработана двухшаговая процедура совмещения.

На первом шаге процедуры совмещения полагаем, что секущая световая плоскость ориентирована перпендикулярно к продольной оси рельса, т. е.  $\alpha = 0$  и  $\mathbf{a}_1 = [\beta \ \gamma \ t_x \ t_y]$ . Следовательно, первые  $K_1$  итераций совмещения выполняются с использованием преобразования  $T$  в виде:

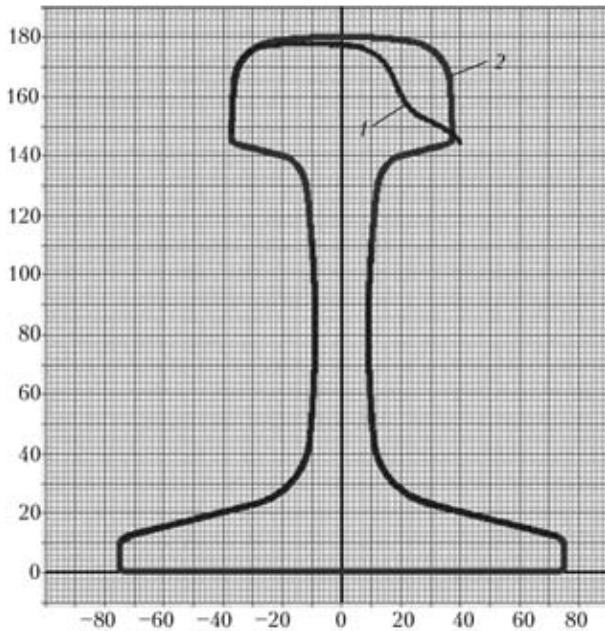


Рис. 3. Результат двухшаговой процедуры совмещения измеренного (1) профиля рельса с эталоном (2) при использовании преобразования  $T_4, T_2$

$$T_4(\mathbf{a}_1; \mathbf{d}_i) = T(\beta, \gamma, t_x, t_y; \mathbf{d}_i) = \mathbf{R}^{-1}(\beta, \gamma) \left( \mathbf{d}_i - \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix} \right) \quad (8)$$

Первый шаг процедуры совмещения позволяет выполнить максимальное приближение измеренного профиля рельса к эталону без учета параметров  $\alpha$  и  $h_B$ , которые влияют на высоту профиля.

Второй шаг процедуры совмещения используется для поиска такого значения параметра  $\alpha$ , которое бы практически не зависело от вертикального износа  $h_B$ . С этой целью на каждой итерации алгоритма ИСР при вычислении функции соответствия  $\phi$  не используются пары сопряженных точек, соответствующие участку рельса, который может быть подвержен значительному вертикальному износу. Например, для рассматриваемого профиля рельса из функции  $\phi$  исключаются точки, которые соответствуют головке рельса и имеют координаты  $x > -25$  мм. Для преобразования  $T$  достаточно использовать вектор параметров, содержащий всего два элемента:  $\mathbf{a}_2 = [\alpha, t_y]$ , где значение  $t_y$  определяет вертикальное смещение точки поворота профиля вокруг оси  $OX$ . Отсюда для выполнения второго шага процедуры совмещения, состоящего из  $K_2$  итераций алгоритма ИСР, используется следующее преобразование:

$$T_2(\mathbf{a}_2; \mathbf{d}_i) = T(\alpha, t_y; \mathbf{d}_i) = \mathbf{R}^{-1}(\alpha) \left( \mathbf{d}_i - \begin{bmatrix} 0 \\ t_y \end{bmatrix} \right) \quad (9)$$

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

На рис. 3 приведен результат выполнения двухшаговой процедуры измеренного профиля рельса с эталоном при использовании преобразований  $T_4, T_2$  в соответствии с формулами (8), (9). Количество итераций на первом и втором шаге фиксированное ( $K_1 = 15, K_2 = 5$ ). Ошибка совмещения  $\epsilon$  такая же, как и при использовании преобразования  $T_5$  (рис. 2), но в данном случае результат совмещения измеренного профиля рельса с эталоном практически не зависит от  $h_B$ , что в дальнейшем позволяет более точно определять значения параметров, характеризующих износ головки рельса.

В ходе экспериментального исследования разработанной двухшаговой процедуры совмещения получено, что при случайном изменении ориентации измеренного профиля рельса относительно эталона в достаточно больших пределах (до  $\pm 10^\circ$  и  $\pm 20$  мм по угловым и линейным параметрам соответственно) значение ошибки совмещения колеблется незначительно (до  $\pm 0,1$  мм). Также экспериментально установлено, что использование большего количества итераций ( $K_1 + K_2 > 20$ ) не приводит к уменьшению ошибки  $\epsilon$ . Среднее время выполнения одной итерации процедуры совмещения на компьютере средней мощности не превышает 0,5 мс, что позволяет выполнять до 100 совмещений в секунду при  $K_1 + K_2 = 20$ .

Таким образом, разработанная процедура совмещения измеренного профиля рельса с эталоном позволяет выполнять обработку результатов сканирования профилей рельсов в масштабе реального времени, что дает возможность осуществлять оперативный контроль геометрических параметров рельсов непосредственно в процессе сканирования, а также обеспечивать достаточно высокую точность совмещения профилей, что позволяет повысить достоверность результатов контроля.

1. Andrew W. Fitzgibbon. Robust registration of 2D and 3D point sets // Image & Vision Computing. — 2003. — 21, № 13. — P. 1145–1153.
2. Li S. Z. Matching: invariant to translations, rotations and scale changes // Pattern Recognition. — 1992. — 25. — P. 583–594.
3. Voss K., Sube H., Brauer-Burchardt C. Affine Point Pattern Matching // Pattern Recognition, Lecture Notes in Computer Science 2191, Springer 2001. — P. 155–162.
4. Huttenlocher D. P., Klanderman G. A., Rucklidge W. J. Comparing images using the Hausdorff distance // Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, 1993. — 15, № 9. — P. 850–863.
5. Brent R. P. Algorithms for Minimization without Derivatives / New Jersey, Prentice-Hall, Englewood Cliffs; Dover Publications, 2002. — 208 p.

Поступила в редакцию 02.01.2009



# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ, РАБОТАЮЩИХ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

В. А. НЕХОТЯЩИЙ, П. С. ЮХИМЕЦ, Г. Я. БЕЗЛЮДЬКО

*Приведены результаты исследований напряженно-деформированного состояния конструкций, работающих под давлением, с помощью магнитного контроля путем измерения коэрцитивной силы. Рассмотренный метод рекомендован для использования при техническом освидетельствовании.*

*The paper gives the results of investigations of the structure stress-strain state for objects operating under pressure, using magnetic inspection by measurement of the coercive force. The considered method is recommended for application at technical examination.*

Безопасность эксплуатации конструкций, работающих под давлением, определяется их запасами прочности и долговечности. Для объективной оценки этих показателей необходима информация о состоянии основного металла и сварных соединений конструкции.

Сосуды давления периодически проходят техническое освидетельствование для установления пригодности к эксплуатации [1]. Основными процедурами этой проверки являются:

- гидравлическое испытание повышенным (пробным), но не более чем в 1,5 раза по сравнению с рабочим, давлением для проверки прочности сосуда и плотности его соединений;
- визуальный осмотр.

В результате такого подхода к освидетельствованию допуск в эксплуатацию объектов, относящихся к категории повышенной опасности, проводится по показателям, не учитывающим в полной мере состояние основного металла и сварных соединений, которое за время эксплуатации могло существенно измениться (из-за наличия дефектов, появления повреждений, перегрузок и т. п.).

В современных условиях, для которых характерно использование более прочных металлов, усложнение условий эксплуатации и в то же время старение оборудования (более 60 % сосудов давления уже отслужили свой нормативный срок) проблема оценки действительного состояния указанных объектов становится еще более актуальной.

В связи со сказанным выше в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины при участии фирмы «Специальные Научные Разработки» (г. Харьков) с использованием опыта магнитной диагностики металлических конструкций [2–4] выполнены исследования по обоснованию возможности применения коэрцитиметрического контроля при техни-

ческом освидетельствовании объектов, работающих под давлением.

На первом этапе изучали изменение коэрцитивной силы (КС) металла цилиндрической оболочки в зависимости от степени деформирования.

Измерения проводили цифровым полуавтоматическим структуроскопом КРМ-ЦК-2М (рис. 1). Для проведения исследований изготовили образец № 1, представляющий собой отрезок трубы диаметром 146×8 мм длиной 500 мм с приваренными плоскими днищами (табл. 1).

Для исключения влияния остаточных напряжений технологического происхождения готовый образец был термообработан.

Измерения проводили на наружной поверхности образца вдоль и поперек его оси симметрии при нагружении:

- пробным давлением 25,5 МПа (режим 1);
- давлением, соответствующим фактической текучести металла 32,5 МПа (режим 2);
- давлением, вызвавшим повсеместное пластическое деформирование металла образца, 35,0 МПа (режим 3);
- при повторном нагружении давлениями, не вызывающими пластическое деформирование металла, 0...32,5 МПа (режим 4).

Результаты измерений представлены на рис. 2–5 (на рис. 3–5 обозначения те же, что и на рис. 2).



Рис. 1. Структуроскоп серии КРМ-ЦК-2М

**Таблица 1. Характеристика образцов**

Образец	Размер (диаметр, толщина стенки), мм	Материал			Участок стенки номинальной толщины				Участок стенки минимальной толщины	
		Марка стали, НД	Механические свойства, не менее		Толщина стенки, мм	Рабочее давление, МПа	Пробное давление, МПа	Давление текучести, МПа	Толщина стенки, мм	Давление текучести, МПа
			$\sigma_r$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа						
1	146 × 8	10, ГОСТ 8731–87	220,0	360,0	8	17,0	25,5	27,0	-	-
2	135 × 3	Ст3, ГОСТ 380–71	220,0	380,0	3	6,5	9,7	10,2	-	-
3	209 × 7	20, ГОСТ 8731–87	238,0	429,0	7	11,8	16,0	17,0	3	7,3

**Таблица 2. Результаты нагружения образца № 1**

Режим нагружения	Давление в образце, МПа	Кольцевые напряжения в % к фактическому пределу текучести	Максимальное приращение КС, %		Остаточное значение КС, %		Остаточная деформация образца по периметру, %
			кольцевое направление	продольное направление	кольцевое направление	продольное направление	
1	25,5	78,7	+ 11,3	+ 46,6	0	0	0
2	32,5	100	+ 15,3	+ 61,6	+ 8,3	+ 8,3	0,10
3	35,0	107,7	+ 25,0	+ 67,5	+ 86,8	+ 28,1	1,08
4	32,5	100	- 34,6	+ 23,0	0	0	0

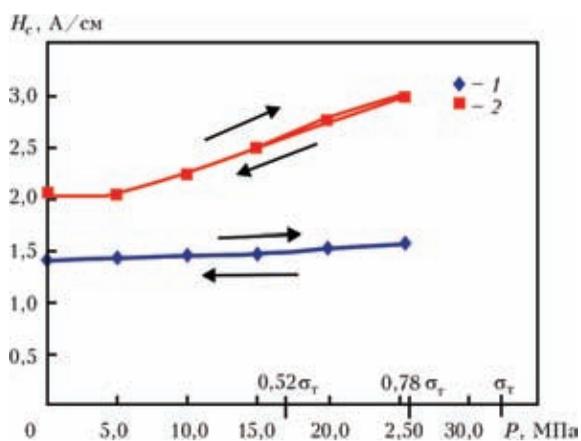


Рис. 2. Нагружение пробным давлением 25,5 МПа (режим 1): 1, 2 — КС в кольцевом и продольном направлении соответственно

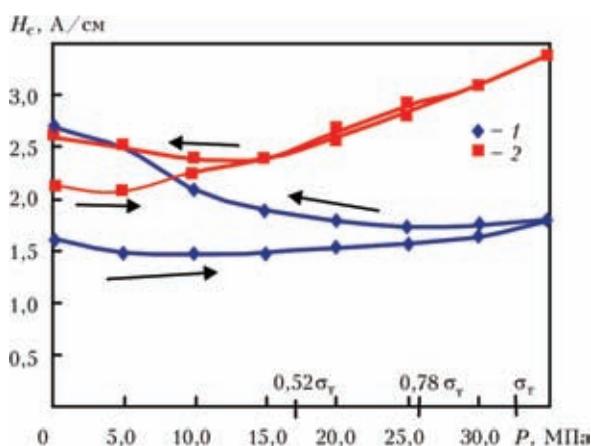


Рис. 4. Нагружение давлением 35,0 МПа, вызвавшим равномерное пластическое деформирование металла (режим 3)

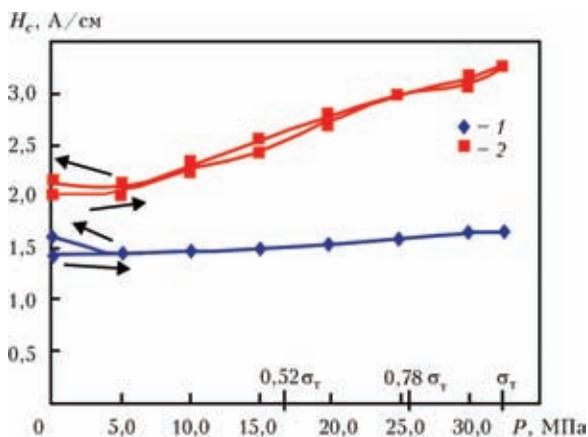


Рис. 3. Нагружение давлением 32,5 МПа, вызвавшим текучесть металла (режим 2)

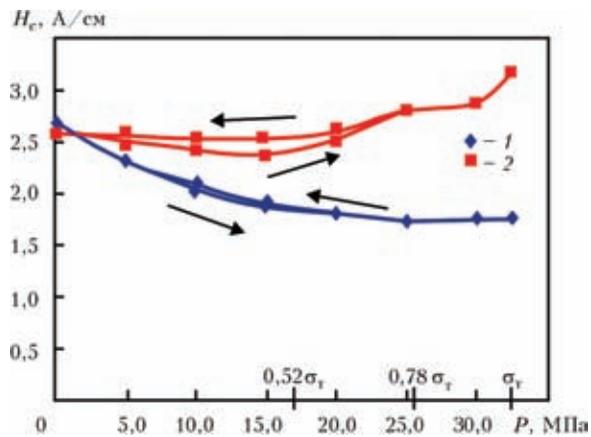


Рис. 5. Зависимость КС от давлений нагрузки и разгрузки при повторном гидроиспытании (режим 4)

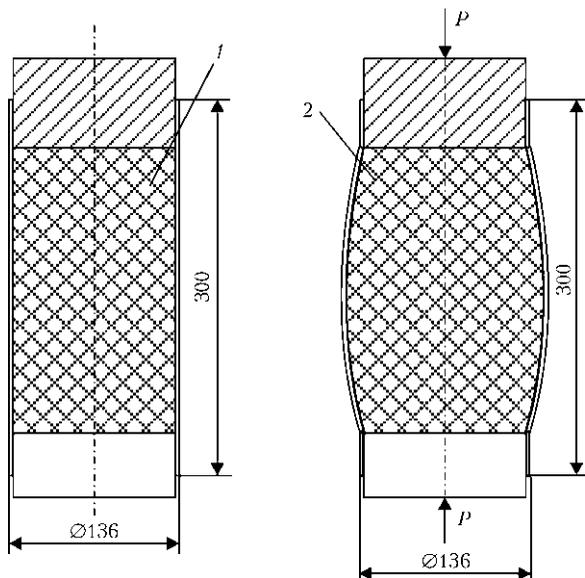


Рис. 6. Схема цилиндрического образца до (1) и после (2) испытания

Анализ зависимостей КС от давления показывает, что их значения различны в продольном и поперечном направлениях (табл. 2).

При нагружении в режиме 1 пробным давлением (25,5 МПа) с ростом давления происходило соответствующее увеличение КС (рис. 2).

Изменение магнитного параметра в продольном направлении было более существенным. Значения КС увеличились на 11,3 и 46,6 % соответственно, поперек и вдоль образца. При сбросе давления исходные значения КС не изменились, что подтвердило упругий характер деформирования исследуемого участка цилиндрической стенки.

После повышения давления в образце до 32,5 МПа, вызвавшем остаточную деформацию 0,1 % (режим 2), зафиксировано появление и остаточной КС (рис. 3).

При давлении 35,0 МПа (режим 3), что в 1,37 раза выше пробного нормативного давления, отмечен существенный рост остаточной КС вследствие пластического деформирования металла (рис. 4).



Рис. 7. Испытание образца в прессе

При этом наиболее существенно (на 86,8 %) возросла КС в кольцевом направлении.

При повторных нагружениях образца внутренним давлением, в том числе и пробным давлением в режиме технического освидетельствования (режим 4), изменение КС вновь стало обратимым. При этом характер изменения КС стал противоположным: с ростом внутреннего давления происходило снижение значения КС в кольцевом направлении (рис. 5). При пробном давлении (25,5 МПа) КС составила лишь 64,7 % значения, имевшего место до нагружения. В продольном направлении, при увеличении давления, наблюдалось незначительное падение и последующий рост КС. Представляется, что данное явление является следствием наличия остаточных сжимающих напряжений, возникших в результате пластического деформирования образца в режиме 3.

Исследование изменения КС при деформациях, предшествующих разрушению, проводилось на трубном образце № 2, сваренном из холоднокатаной стали Ст3 толщиной 3 мм. Образец диаметром 135 мм и длиной 300 мм нагружался в прессе сжатия П-50. Испытание заключалось в деформировании образца под действием радиальной нагрузки (рис. 6).

В качестве рабочей среды, передающей давление на стенку образца, применена листовая резина, обработанная тальком для уменьшения межслойного трения.

В процессе испытания при фиксированной нагрузке и после ее снятия измерялись:

- периметр образца  $P$ , мм;
- база  $a$ , мм;
- значение КС  $H_c$  (А/см) в кольцевом направлении.

Было проведено четыре нагружения образца (рис. 7), сопровождающиеся пластическим деформированием его стенки. После появления трещины в околошовной зоне сварного шва испытание было прекращено. Результаты испытания приведены в табл. 3 и на рис. 8.

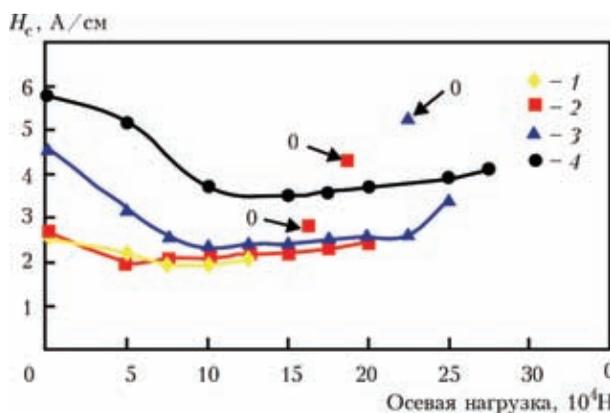


Рис. 8. Зависимость КС от осевой нагрузки: 1-4 — номера нагружений

**Таблица 3. Результаты испытаний образца № 2**

Осевая нагрузка, $10^4$ Н	Нагрузки											
	1			2			3			4		
	$H_c$ , А/см	$a$ , мм	$P$ , мм	$H_c$ , А/см	$a$ , мм	$P$ , мм	$H_c$ , А/см	$a$ , мм	$P$ , мм	$H_c$ , А/см	$a$ , мм	$P$ , мм
0	2,6	98	427,5	2,6	98	427,5	4,6	101	437	5,8	110	472
5	2,2	98	427,5	2,0	98	427,5	3,2	102	437	5,2	111	473
7,5	2,0	98	427,5	2,0	98	427,5	2,6	102	437	—	—	—
10	2,0	98	427,5	2,0	98	427,5	2,3	102	437	3,7	111	473
12,5	2,1	98	427,5	2,1	98	427,5	2,4	102	437	—	—	—
0	2,6	98	427,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
15	—	—	—	2,2	99	428,5	2,4	102	437	3,5	111	473
0	—	—	—	2,8	98	427,5	—	—	—	—	—	—
17,5	—	—	—	2,3	100	430,5	2,5	102	437	3,6	113	480
0	—	—	—	4,3	99	430,0	—	—	—	—	—	—
20	—	—	—	2,5	102	438,0	2,5	102	437	3,7	114	485
0	—	—	—	4,6	101	437,0	—	—	—	—	—	—
22,5	—	—	—	—	—	—	2,6	104	446	—	—	—
0	—	—	—	—	—	—	5,3	103	445	—	—	—
25	—	—	—	—	—	—	3,4	111	473	3,9	115	490
0	—	—	—	—	—	—	5,4	110	472	—	—	—
27,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4,1	117	491
0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6,3	116	490

По аналогии с результатами исследований на образце № 1 в процессе деформирования образца № 2 отмечено снижение КС до определенного предела (табл. 3).

Результаты испытаний трубного образца (см. рис. 9, табл. 4) подтвердили существование линейной зависимости между КС и пластической деформацией [5]:

$$H_c = H_c^0 + A\varepsilon,$$

где  $\varepsilon$  — остаточная деформация;  $H_c^0$  — КС металла образца перед испытанием;  $A$  — коэффициент, характерный для каждой марки стали.

**Таблица 4. Изменение КС при деформировании образца до разрушения**

Осевая нагрузка, $10^4$ Н	Под нагрузкой		Без нагрузки	
	$H_c$ , А/см	Степень деформации, %	$H_c$ , А/см	Степень деформации, %
0	—	—	2,6	—
15	2,2	1	2,8	—
17,5	2,3	2	4,3	1
20	2,5	4	4,6	3
22,5	2,6	6	5,3	5
25,0	3,4	13	5,4	12
27,5	4,1	19	6,3	18

На момент разрушения трубного образца, которое произошло при деформации 18 %, КС, измеренная после снятия нагрузки, увеличилась в 2,4 раза по сравнению с исходным состоянием ( $H_c = 2,6$  А/см).

Отмеченное ранее различие между значениями КС в нагруженном и разгруженном состояниях прослеживалось с момента начала пластического деформирования вплоть до разрушения образца и находилось в пределах 2...2,3 А/см. При наступлении текучести металла КС под нагрузкой была на уровне 2,3 А/см, в разгруженном состоянии она увеличилась до 4,3 А/см. Перед разру-

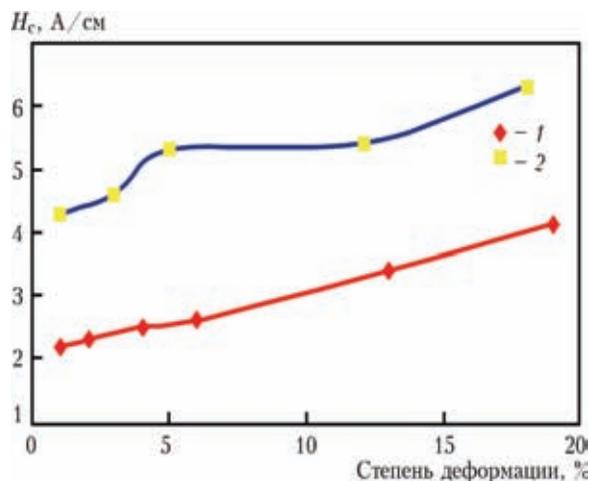


Рис. 9. Зависимость КС от степени пластической деформации: 1, 2 — соответственно под нагрузкой и без нагрузки

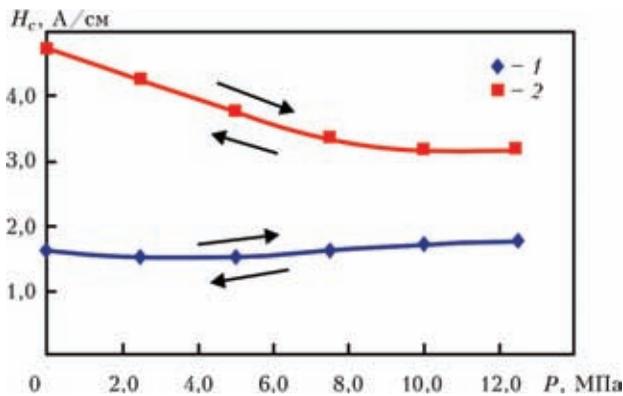


Рис. 10. Зависимость КС от давления нагрузки (1) и разгрузки (2) при гидроиспытании образца № 3

шении образца КС равнялась 4,1 А/см, а после снятия нагрузки 6,3 А/см.

Как следует из измерений, выполненных при проведении исследований, с помощью КС появляется альтернативный метод оперативного обнаружения участков конструкции с повреждениями. В этой связи на следующем этапе исследований был поставлен опыт по оценке технического состояния трубы с локальным утонением. Исследовался образец № 3, изготовленный из трубы 209Х7 мм длиной 1100 мм (табл. 1).

Измерения КС проводили на участках с номинальной и минимальной толщиной стенки после нагружения давлением, вызывавшем, по результатам измерения КС, пластическое деформирование в зоне утонения. Подъем давления происходил с шагом 2,5 МПа. Результаты измерений КС представлены на рис. 10 (кривые 1 и 2).

Кривая 1 свидетельствуют об отсутствии пластического деформирования стенки номинальной толщины в процессе предварительного нагружения: с ростом давления при повторном нагружении снижение КС не происходит. Напротив, кривая 2 отображает КС участка стенки, который подвергся пластической деформации: во-первых, она более чем в два раза превосходит значения КС участков стенки номинальной толщины, во-вторых, с ростом нагрузки происходит существенное снижение КС в кольцевом направлении. Полученный результат находится в полном соответствии с данными табл. 3, согласно которым при рабочем давлении участок с минимальной толщиной стенки, начиная с давления 7,3 МПа, находился в состоянии текучести.

Проведенный опыт наглядно показал, что измерения КС позволяют обнаружить участки конструкции с остаточной деформацией.

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

В результате проведения исследований на трубных образцах установлено следующее:

— при упругопластическом деформировании монотонный рост КС происходит в случае отсутствия в металле остаточных напряжений;

— при наличии в металле остаточных напряжений рост КС при упругопластическом деформировании начинается с момента компенсации остаточных напряжений напряжениями от внешней нагрузки (на момент компенсации фиксируется минимальное значение КС);

— при многократных нагружениях в упругопластической области, не сопровождающихся увеличением степени деформирования, зависимость КС от нагрузки повторяет график разгрузки в первом цикле нагружения;

— при упругопластическом деформировании КС металла под нагрузкой ниже, чем в разгруженном состоянии, причем значение КС после разгрузки тем больше, чем выше уровень пластического деформирования;

— превышение КС после разгрузки по сравнению с нагруженным состоянием сохраняется при упругопластическом деформировании вплоть до разрушения;

— вне зависимости от наличия давления в образце измерения КС позволяют обнаружить участки, претерпевшие локальные пластические деформации.

Практическая ценность полученных результатов состоит в том, что их использование расширяет возможности оценки технического состояния объектов, работающих под внутренним давлением.

1. ДНАОП 0.00-1.07-98. Правила будови та безпечної експлуатації посудин, що працюють під тиском.
2. Методические указания «Магнитный контроль напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса подъемных сооружений при проведении их обследования и техническом диагностировании». РД ИКЦ «Кран»-007-97.
3. Безлюдько Г. Я., Мужичицкий В. Ф., Попов Б. Е. Магнитный контроль (по коэрцитивной силе) напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса стальных металлоконструкций // Завод. лаб. — 1999. — № 9. — С. 53-57.
4. Долинский В. М., Рязов Д. Г., Новик В. Г. О возможности контроля состояния металла по результатам измерения коэрцитивной силы // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2000. — № 4. — С. 65-67.
5. Христенко И. М., Кривова В. В. Влияние пластической деформации на коэрцитивную силу малоуглеродистой стали // Дефектоскопия. — 1984. — № 6. — С. 90-92.

Поступила в редакцию  
05.09.2009

## ПРИМЕНЕНИЕ ТЕПЛОВИЗИОННОГО КОНТРОЛЯ ПРИ СВАРКЕ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБ

В. Ю. ГЛУХОВСКИЙ, А. В. КОСТЕНКО

*Рассмотрен новый подход к контролю сварных швов полиэтиленовых труб с помощью тепловизионного метода. Проведены исследования по применению тепловизионного контроля для обнаружения возможных дефектов в сварном шве, а также материалографические исследования образцов, подтверждающие результаты, полученные с помощью тепловизионного контроля.*

*A new approach to control of polyethylene pipe welds using heat monitoring technique is considered. Investigations on application of heat monitoring to detect possible defects in the weld have been conducted. Materialographic investigations of samples have been performed, which confirm the results obtained in heat monitoring.*

В последние годы в Украине стали широко использовать полимерные трубы для строительства и ремонта инженерных сетей разного назначения (водо- и газопроводы, тепло- и канализационные сети). Это связано с тем, что полимеры объединяют в себе довольно высокую прочность, стойкость к распространению трещин, легкость обработки в сравнении с металлами, высокую химическую и коррозионную стойкость и т. д. Уменьшение расходов во время строительства полимерных трубопроводов в сравнении с металлическими может составлять от 30 до 70 % за счет скорости монтажа, отсутствия антикоррозионной обработки, катодной защиты и специального оборудования траншей [1].

Наиболее распространенными среди полимеров, которые используются в промышленности, являются полиэтилен, полипропилен и поливинилхлорид. Однако именно полиэтилен является наиболее используемым материалом за счет повышенных физико-механических характеристик и наиболее выгодных для производителей расходов на получение и переработку сырья.

Монтаж полимерных трубопроводов проводят с помощью различных способов, наиболее распространенными из которых являются термические (стыковая сварка, сварка в раструб и терморезисторная сварка) [2]. Стыковая сварка используется для труб с толщиной стенки не менее 5 мм и диаметром 63...1200 мм. Раструбную и терморезисторную сварку используют при различных толщинах стенки и диаметра труб. При этом необходимо наличие соответствующих соединительных деталей, которые уменьшают скорость монтажа, но увеличивают стоимость сварного соединения.

Необходимо отметить, что процесс сварки металлических трубопроводов включает процедуру неразрушающего контроля как металла зоны шва, так и зоны термического влияния в процессе свар-

ки, а также в процессе эксплуатации трубопроводной сети. Это связано с тем, что трубопровод должен работать под высоким давлением и испытывать большие термомеханические нагрузки, а наличие дефектных зон в местах соединения повышает риск разрушения изделия.

Трубопроводы, изготовленные из полимеров (полиэтилен, полибутилен и т. д.) работают под меньшими давлениями, что уменьшает теплофизические нагрузки [3]. При этом не принимаются во внимание более низкие прочностные характеристики полимеров в сравнении с металлами, а также другой характер взаимодействия поверхностей в зоне сварного соединения. Процесс сварки полимерных материалов не контролируется, что повышает риск образования дефектов в зоне шва и в зоне термического влияния. И, как следствие, увеличивает вероятность разрушения полимерных конструкций в процессе эксплуатации.

Основными параметрами, влияющими на качество сварного шва, являются температура торцов труб перед сваркой, параллельность поверхности торцов, давление сварки, давление усадки и время охлаждения сварного шва. Все перечисленные параметры можно контролировать,



Рис. 1. Внешний вид стыкового соединения

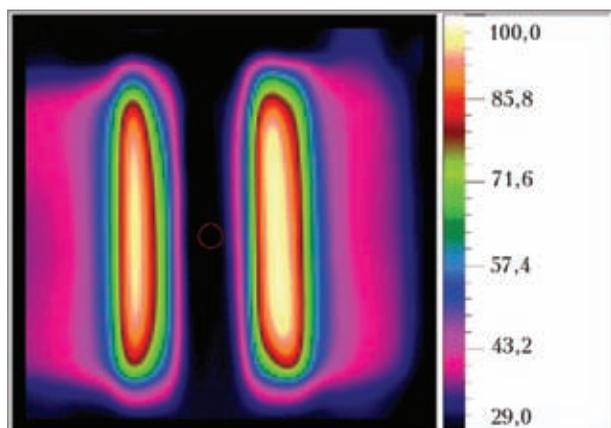


Рис. 2. Термограмма поверхности торцов труб перед сдавливанием

за исключением температуры торцов свариваемых труб. Применение точечных методов определения температуры (термопарный, пирометрический) не позволяет увидеть и оценить температурное поле торцов перед сваркой. При этом неоднородность температурного поля торцов может приводить к возникновению дефектов в сварных швах, а снижение средней температуры торцов ниже температуры сварки — к формированию сварного шва с низкими физико-механическими свойствами.

В последние годы достигнуты значительные успехи в создании оборудования для сварки пластмасс и отработаны надежные технологии. Однако контроль качества сварных соединений из пластмасс все еще связан с некоторыми сложностями, которые зависят от способа и технологии сварки, вида сварных конструкций, свойств полимерного материала и его строения. В связи с этим большое значение уделяется повышению эффективности контроля качества сварных соединений полимерных материалов [4].

Для анализа температурного поля торцов труб в процессе сварки был применен тепловизионный метод контроля, который базируется на фиксации теплового излучения, идущего от объекта контроля, с визуализацией полученной информации [5]. Зоны сварного шва и термического влияния были сфотографированы тепловизионной камерой с последующей компьютерной обработкой полученных термограмм. Так, с помощью данного

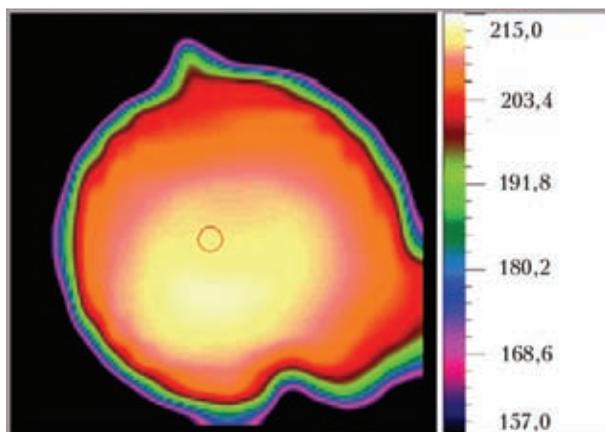


Рис. 3. Термограмма нагревательного устройства для стыковой сварки полиэтиленовых труб

метода можно определить неоднородности теплового поля объекта, которые могут свидетельствовать о наличии дефектов в конструкции [6].

Метод тепловизионного контроля был применен при сварке труб из полиэтилена марки ПЕ 80 (рис. 1) диаметром 110 мм и толщиной стенки 6,3 мм. Сварку труб осуществляли стыковой сваркой на установке Widos–Polypress 4600. Параметры сварки устанавливали согласно действующей нормативно-технической документации [7]. Температура нагревательного устройства составляла 200...215 °С (рис. 3), время нагревания торцов трубы 60 с, технологическая пауза перед сдавливанием 3...4 с, сварочное давление 0,2 МПа, время охлаждения 10 мин. На рис. 2 показана термограмма торцов труб перед сдавливанием, где виден неравномерный прогрев торцов. Средняя температура левого торца на 10...12 °С отличается от средней температуры правого. Это можно объяснить неравномерным распределением температуры по поверхности нагревательного устройства, которая колеблется в пределах 200...215 °С (рис. 3).

На термограммах торцов полиэтиленовых труб были отмечены четыре температурные зоны, значения температур в которых были разными. Так, из рис. 4, а видно, что максимальная температура торцов трубы — с левого и правого краев, средняя температурная зона находится внизу, а минимальная — вверху торца. Разница температур  $\Delta T =$

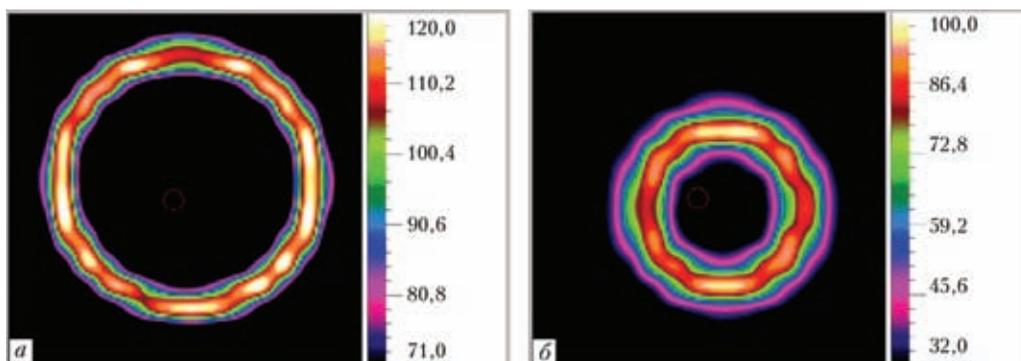


Рис. 4. Термограммы торцов полиэтиленовых труб непосредственно перед сваркой: а — правый торец; б — левый

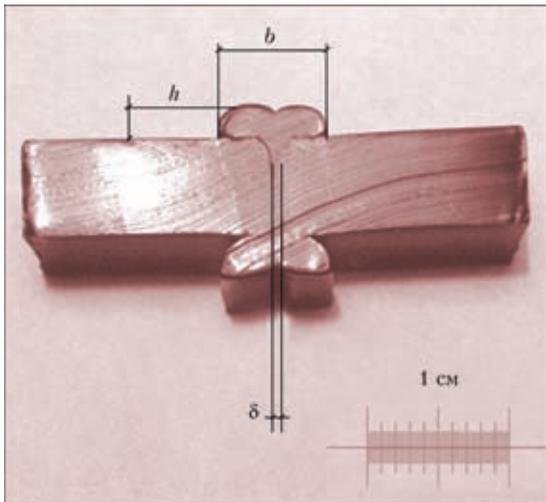


Рис. 5. Пример измерения параметров сварного соединения

$= T_{\max} - T_{\min} = 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , где  $T_{\max}$  и  $T_{\min}$  — средняя температура верхней и нижней зон соответственно.

Из термограммы на рис. 4, б видно, что высокотемпературные зоны ( $T_{\text{ср}} = 97 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) находятся в нижней и верхней зонах торца, а низкотемпературные ( $T_1^{\text{ср}} = 97 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) расположены с боков торца труб. Необходимо отметить, что разница температур  $\Delta T^{\text{ср}} = T_1^{\text{ср}} - T_2^{\text{ср}}$  и равна  $12 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , где  $T_1^{\text{ср}}$  — средняя температура верхней и нижней зон торца;  $T_2^{\text{ср}}$  — средняя температура боковых зон торца трубы.

После сварки были проведены исследования структуры полученных сварных соединений (рис. 5). Был проведен контроль геометрических параметров внешнего грата (в соответствии с действующей нормативно-технической документацией [7]); вырезали отдельные фрагменты сварного соединения, из которых изготавливали шлифы для визуальной оценки размеров зоны основного термического влияния и характера взаимодействия соединенных поверхностей в зоне сварки [8].

Контроль внешнего грата показал, что его ширина  $b$  лежит в пределах  $b = 7,4 \dots 7,9 \text{ мм}$ , что превышает допустимые значения, которые находятся в пределах  $3 \dots 7 \text{ мм}$ . Высота грата  $h$  удовлетворяет нормальным условиям, которые лежат в пределах  $2 \dots 3 \text{ мм}$ , при этом  $h = 2,3 \dots 2,7 \text{ мм}$  (рис. 6).

Чрезмерная ширина грата является недопустимой и свидетельствует о том, что во время сварки было превышено время нагрева или увеличено значение температуры нагревательного элемента. Такие изменения технологических параметров можно контролировать с помощью тепловизионного метода контроля, если проводить контроль оптимального распределения температур в зоне сварки после удаления нагревательного устройства, как показано на рис. 2. Сравнивая термограммы, сделанные при таких же условиях с эта-

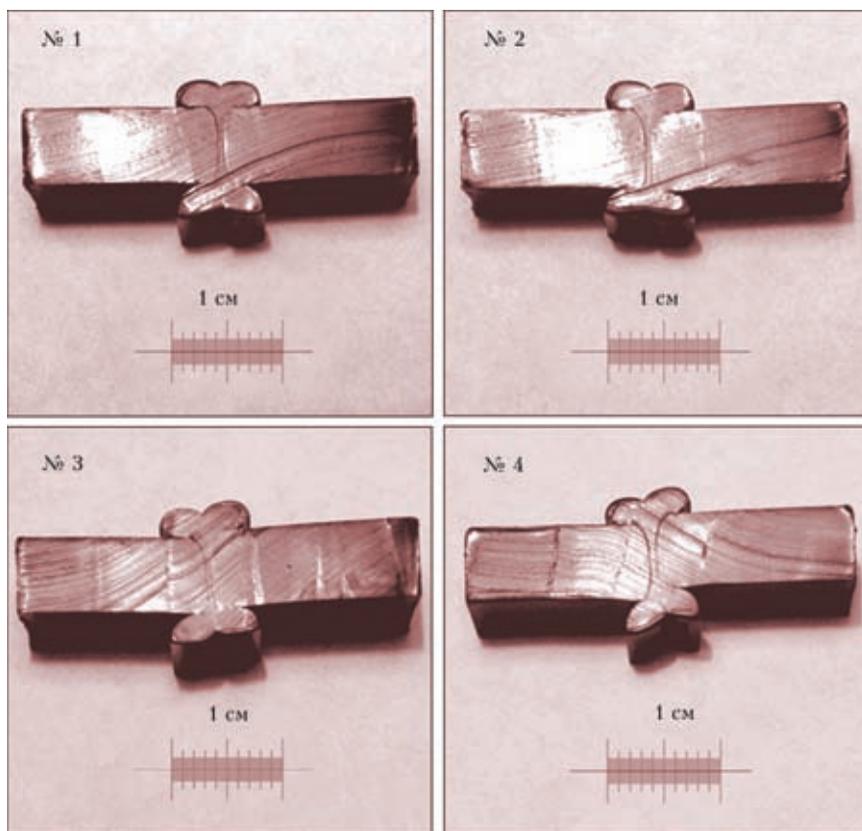


Рис. 6. Макрошлифы сварных соединений полиэтиленовых труб (№ 1, 4 — соответственно верхняя и нижняя температурные зоны; № 2, 3 — правая и левая)



лонной, можно определять нежелательные отклонения от технологических параметров сварки.

Исследования особенностей структуры полученных соединений показали неравномерность распределения температуры по поверхности торцов перед сваркой, что может свидетельствовать о разной глубине прогревания участков труб. При исследовании макрошлифов основное внимание необходимо обратить на отсутствие линии раздела в центральной части поперечного сечения шва и на параметр  $\delta$ , который не должен превышать 12 % толщины стенки труб (рис. 5) [8]. Значение  $\delta$  для труб с толщиной стенки 6,3 мм лежит в пределах 0,5...0,76 мм.

Фактическое значение параметра  $\delta$  колеблется в пределах 0,62...0,86 мм, при этом максимальная граница превышена для образца на рис. 6, № 2. Причиной такого отклонения может быть увеличенная глубина термического влияния за счет неравномерного температурного поля нагревательного устройства (рис. 3) и увеличения времени нагрева.

### Выводы

1. Процесс сварки полиэтиленовых труб необходимо контролировать методами неразрушающего контроля.

2. Неравномерное нагревание поверхности торцов труб может приводить к возникновению различных дефектов, которые в свою очередь могут привести к разрушению конструкции.

3. Применение тепловизионного контроля при сварке полимерных конструкций является эффективным инструментом для выявления различных дефектов, возникающих в процессе сварки.

4. Разработка технологии тепловизионного контроля при сварке полиэтиленовых конструкций является перспективным направлением, которое поможет повысить качество сварки и уменьшить процент брака при производстве сварных конструкций.

1. Бухин В. Е., Фаттахов М. М. Полимерные материалы, используемые при строительстве трубопроводов/ Инженерные сети из полимерных материалов. — 2008. — № 3(25) — С. 45 — 49.
2. Зайцев К. И., Мацюк Л. Н. Сварка пластмасс. — М.: Машиностроение, 1987. — 250 с.
3. Каган Д. Ф. Трубопроводы из пластмасс. — М.: Химия, 1980. — 222 с.
4. Балабанина Г. В., Истратов И. Ф. Контроль качества сварных соединений из пластмасс в строительстве. — М.: Стройиздат, 1975. — 192 с.
5. Маслова В. А., Стороженко В. А. Термография в диагностике и неразрушающем контроле. — Харьков: Компания СМИТ, 2004. — 160 с.
6. Infrared thermography for high-temperature pressure pipe, by Gontain Shen and Tao Li, INSIGHT (Non-Destructive Testing and Condition Monitoring), March 2007. — 49, №3. — P. 151.
7. РСН 358–91. Сварка полиэтиленовых труб при строительстве газопроводов.
8. Вундерлих Б. Физика макромолекул. Кристаллическая структура, морфология, дефектность. — М.: Мир, 1976. — 624 с.

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

*Поступила в редакцию  
22.12.2009*

## **МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ С ЭЛЕМЕНТАМИ НАУЧНОЙ ШКОЛЫ ДЛЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ «ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ЭКОНОМИКА В МАШИНОСТРОЕНИИ»**

**20–21 мая 2010 г. Юрга, ЮТИ ТПУ**

### **Секции и научные направления конференции**

1. Инновационные технологии получения неразъемных соединений в машиностроении
2. Инновационные технологии получения и обработки материалов в машиностроении
3. Автоматизация, информатизация, экономика и менеджмент на предприятии
4. Защита окружающей среды, безопасность и охрана труда на предприятии
5. Передовые технологии и техника для разработки недр и землепользования
6. Научная школа для молодых ученых «Новые и новейшие технологии в машиностроении»

**Адрес оргкомитета**

**ЮТИ ТПУ, 652055, Кемеровская область, г. Юрга, ул. Ленинградская, д. 26  
Тел.: (+7 38451) 6-53-95, факс: (+7 38451) 6-53-95, www.uti.tpu.ru, utiscience@rambler.ru**

## ПРОБЛЕМЫ РЕСУРСА И БЕЗОПАСНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ КОНСТРУКЦИЙ, СООРУЖЕНИЙ И МАШИН

(итоговая научная конференция в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины)

22 января 2010 г. в Институте электросварки им. Е. О. Патона состоялась итоговая научная конференция, посвященная рассмотрению научных и прикладных результатов, полученных в течение 2007–2009 гг. при выполнении проектов целевой комплексной программы НАН Украины «**Проблемы ресурса и безопасной эксплуатации конструкций, сооружений и машин**». В работе конференции приняли участие научные руководители и исполнители проектов, а также представители заинтересованных министерств, ведомств, учебных и отраслевых институтов, промышленных предприятий и организаций.

Конференцию открыл научный руководитель программы Президент Национальной академии наук Украины академик Б. Е. Патон, который отметил, что «...сегодня особую актуальность приобретают проблемы управления эксплуатационной надежностью и долговечностью ответственных объектов путем определения их технического состояния, остаточного ресурса и установления научно обоснованных терминов эксплуатации». На решение этих проблем и направлена комплексная программа НАН Украины. Ее цель — создание методологических основ, технических средств и технологий для оценки и продления ресурса ответственных объектов длительной эксплуатации. К выполнению этой программы, состоящей из 9 разделов и включающих 118 проектов, были привлечены 26 институтов восьми отделений НАН Украины. По мнению Б. Е. Патона, в течение трех лет были получены важные научно-технические и практические результаты. Среди них:

- разработка методики оценки прочности и долговечности трубопроводов на основе двукритериальной диаграммы разрушения при наличии стресс-коррозионных дефектов с регламентированием допустимого коэффициента запаса прочности и предложенной процедурой расчета его реального значения;

- разработка технологии ремонтной сварки корпусных деталей паровых турбин и арматуры высокого давления для продления ресурса турбоагрегатов ТЭС;

- расчет по критериям механики разрушения допустимых размеров трещиноподобных дефектов в стенках питающих трубопроводов энергоблоков сверхкритического давления ТЭС в зависимости от их формы и содержания примесей в рабочей среде;

- отработка технологии изготовления низкочастотных пьезокерамических двух-

компонентных акселерометров для вибрационного контроля главных циркуляционных насосов АЭС при эксплуатации в условиях температур до 300 °С. Изготовлены опытные образцы акселерометров и исследованы их характеристики;

- выполнены работы по оптимизации сварочных технологий и материалов для восстановления и продления ресурса действующих мостов. Создан полуавтомат для восстановления дуговой сваркой подводных металлоконструкций с целью продления их ресурса;

- созданы и внедрены в КБ «Южное» технология и оборудование для диагностики элементов конструкций из композиционных материалов методами лазерной интерферометрии;

- разработаны и исследованы образцы слоисто-комбинированных волокнистых композиционных материалов, на основе которых созданы эластичные взрывозащитные камеры для безопасной резки и обработки металлоконструкций;

- изготовлены для нефтехимической отрасли опытная партия эмали с использованием модифицированных полиуретановых лакокрасочных материалов для противокоррозионных покрытий и проведена опытно-промышленная проверка с нанесением ее на элементы оборудования и трубопроводы Лисичанского нефтеперерабатывающего комбината;

- разработана технология, повышающая в 3...4 раза ресурс долот для бурения скважин при добыче рассеяного или шахтного метана;

- установлено, что при длительной эксплуатации значительно изменяются электрические свойства металла стенки магистральных трубопроводов. Построены корреляционные зависимости изменения механических и электрохимических свойств, которые



Президиум конференции (слева направо): академик НАН Украины И. К. Походня, академик Б. Е. Патон и академик НАН Украины Л. М. Лобанов



открывают возможности прогнозирования эксплуатационной надежности металла трубопроводов.

В процессе выполнения программы были получены и другие важные научно-технические и практические результаты. Вместе с тем, по мнению Б. Е. Патона, программа содержала ряд мелких проектов, не имеющих ясных перспектив использования полученных результатов.

Важно отметить, что научный совет программы обеспечил подготовку издания итогового сборника статей научных руководителей проектов программы «Проблемы ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин» (Киев, изд. ИЭС им. Е. О. Патона, 2009. — 710 с.). Сборник содержит основные научные и прикладные результаты работ, полученных при выполнении проектов (заказать сборник можно в ИЭС им. Е. О. Патона по тел. 529-26-23).

Затем на конференции выступили научные руководители разделов программы.

Академик НАН Украины *В. И. Махненко*, научный руководитель раздела «Разработка методологических основ оценки технического состояния и обоснованности безопасного срока эксплуатации конструктивных элементов объектов повышенной опасности на территории Украины», в своем выступлении сообщил, что все шесть проектов раздела программы связаны с такими ответственными объектами, как парогенераторы (атомная энергетика), магистральные трубопроводы, железнодорожный транспорт, жилищные и производственные строения в зоне шахтных выработок. По всем этим направлениям получены важные результаты.

Академик НАН Украины *З. Т. Назарчук*, научный руководитель раздела «Разработка методов и новых технических средств неразрушающего контроля и



диагностики состояния материалов и изделий длительной эксплуатации», в своем выступлении отметил, что создана эффективная система мониторинга, новые средства неразрушающего контроля качества элементов ряда жизненно важных объектов, а также подготовлена к серийному производству новая диагностическая аппаратура.

Научный руководитель раздела «Разработка методов защиты от коррозии элементов конструкций объектов длительной эксплуатации» член-корр. НАН Украины *В. И. Похмурский* отметил, что в перечне наиболее важных результатов выполненных проектов следует отметить разработку покрытий для повышения эксплуатационной надежности труб и котлов электростанций, разработку покрытий для защиты от фреттинг-коррозии, разработку методов защиты от коррозии стальной арматуры для продле-



Рабочий момент конференции

ния ресурса железобетонных конструкций. Он отметил важность создания государственной целевой программы работ по защите от коррозии конструкций мостов и других объектов в базовых отраслях промышленности Украины вплоть до 2015 г.

По разделу «Разработка эффективных методов оценки и продления ресурса объектов атомной энергетики» (научный руководитель академик НАН Украины И. М. Неклюдов) выступил д-р техн. наук *В. Н. Воеводин*. Он подчеркнул, что основная часть проектов по разделу выполнена с участием сотрудников АЭС Украины. Проанализировано напряженно-деформированное состояние корпусов реакторов ВВЭР-1000, парогенераторов и сварных швов трубопроводов турбинного отделения энергоблоков Запорожской и Южно-Украинской АЭС. Установлены основные причины разрешения трубопроводов обвязки, предложена экспертная методика их контроля с помощью магнитных методов.

Академик НАН Украины *Б. С. Стогний*, подводя итоги исследований по разделу «Повышение надежности и продление ресурса энергетического оборудования и систем», отметил, что получены важные результаты, которые будут использованы для повышения надежности и увеличения сроков службы турбин, генераторов, оборудования станций газоперекачки, а также при модернизации котельного оборудования коммунальной энергетики и угольных энергоблоков. Благодаря проведенным исследованиям сформулированы и обоснованы основные мероприятия по увеличению ресурса работы элементов котельного оборудования децентрализованной теплоэнергетики.

О научных результатах, полученных по разделу «Создание систем мониторинга технического состояния трубопроводов и объектов газо- и нефтеперерабатывающей промышленности», сообщил его научный руководитель член-корр. НАН Украины *А. Я. Красовский*. К наиболее важным достижениям он отнес создание компьютерной системы обеспечения целостности магистрального трубопровода, разработку универсального алгоритма расчета давления в составляющих трубопроводной системы, оценку конструкционной прочности трубопроводов с дефектами.

Выступление академика НАН Украины *Л. М. Лобанова* было посвящено полученным результатам по 22 проектам раздела «Повышение надежности и продление ресурса мостов, строительных, промышленных и транспортных конструкций». Среди них разработка технологии ремонтной сварки корпусных деталей турбин, разработка низководородных электродов для сварки и ремонта мостовых и транспортных конструкций и др.

О результатах, полученных по проектам раздела «Разработка технологий ремонта и восстановления

элементов конструкций объектов повышенной опасности с целью продления сроков их эксплуатации» (научный руководитель академик НАН Украины К. А. Ющенко) доложил д-р техн. наук *О. Г. Касаткин*.

Научный руководитель раздела программы «Подготовка и издание нормативных документов и научно-технических пособий по вопросам оценки ресурса объектов длительной эксплуатации» академик НАН Украины *В. В. Панасюк* в своем выступлении отметил, что в течение 2007–2009 гг. были подготовлены и вышли в свет современные научно-технические справочные пособия в помощь инженерно-техническим работникам конструкторских и промышленных предприятий для оценки долговечности и надежности (ресурса) элементов конструкций длительной эксплуатации, в частности мостовых и строительных конструкций, тепловых и атомных электростанций, трубопроводов и т. п.

Затем состоялось обсуждение полученных научных результатов, изложенных в докладах научных руководителей разделов программы. В обсуждении приняли участие доктор техн. наук *В. И. Король* (директор Донбасского центра технологической безопасности), *П. И. Кривошеев* (директор НИИ строительных конструкций), *А. И. Лантух-Лященко* (профессор кафедры мостов и туннелей Национального транспортного университета), *В. И. Большаков* (директор ИЧМ им. З. И. Некрасова).

Все выступившие отметили актуальность и важность полученных результатов для решения проблемы ресурса объектов длительной эксплуатации, высказали мнение о целесообразности продолжить выполнение программы «Проблемы ресурса и безопасности эксплуатации конструкций, сооружений и машин» в 2010–2012 гг.

В заключение академик *Б. Е. Патон* отметил: «...считаю, что нам нужно поддержать предложение научного совета относительно продления выполнения программы «Ресурс» в последующие три года. Необходимо поручить научному совету сформировать новые этапы работ, сконцентрировав научные силы на наиболее актуальных направлениях исследований, предусмотрев, прежде всего, практическое использование полученных результатов. При этом особенно подчеркиваю, что при проведении конкурса первоочередное внимание необходимо обратить на финансирование комплексных крупных работ, а не распылять средства на выполнение мелких проектов».

В завершение было принято решение отчетной конференции.

*О. Г. Касаткин, д-р техн. наук  
В. Н. Липодаев, д-р техн. наук*



### Ігорю Яковлевичу Шевченко – 70!

13 января 2010 г. исполнилось 70 лет одному из ведущих специалистов Украины в области НК и ТД, заведующему лабораторией ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, директору ГП АЦНК при ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ, члену бюро Правления УОНКТД, канд. техн. наук **Шевченко Игорю Яковлевичу**.

После окончания Киевского политехнического института И. Я. Шевченко более 45 лет работает в ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. Научная и практическая деятельность Игоря Яковлевича направлена на разработку технологий и оборудования для УЗ контроля электросварных труб, объектов топливно-энергетического комплекса, железнодорожного транспорта и др. Под его руководством и непосредственном участии созданы установки для автоматизированного УЗ контроля труб, которые были внедрены на Челябинском, Волжском, Серовском, Харцызском трубных заводах.

На основании проведенных И. Я. Шевченко исследований разработаны оригинальные методики неразрушающего УЗ контроля сварных соединений различного технологического оборудования. Особое внимание он уделил разработке методов УЗ контроля акустических сварных соединений.

Идеи и разработки Игоря Яковлевича защищены 15-ю авторскими свидетельствами и освещены более чем в ста публикациях.

И. Я. Шевченко — член редколлегии журнала «Техническая диагностика и неразрушающий контроль», член Национального аттестационного комитета по неразрушающему контролю, эксперт Госгортехнадзора Украины по грузоподъемным сооружениям, сосудам, работающим под давлением, объектам химии и нефтехимии. Как специалист III уровня квалификации по ультразвуковому, визуально-оптическому, капиллярному контролю и акустической эмиссии и являясь директором АЦНК при ИЭС, проводит большую работу по подготовке специалистов по НК.

И. Я. Шевченко обладает незаурядными деловыми качествами, проявляет самостоятельность в принятии решений, честный, коммуникабельный и добропорядочный в отношениях с сотрудниками и партнерами, принципиальный и скромный, чем заслужил любовь и уважение сослуживцев.

Искренне желаем Игорю Яковлевичу крепкого здоровья, долгих лет жизни, счастья, удачи, деловой и творческой активности, неустанного движения вперед, успешного свершения всех планов!

*Дирекция и сотрудники ИЭС  
Правление Украинского общества НКТД  
Редколлегия и редакция журнала "ТДНК"*



### Юрію Миколайовичу Поспайко – 60!

5 січня 2010 року виповнилось 60 років від дня народження визнаному спеціалісту в галузі неруйнівного контролю, провідному інженеру-технологу ІЕС ім. Є. О. Патона НАН України **Поспайку Юрію Миколайовичу**.

Поспайко Ю. М. працює в ІЕС ім. Є. О. Патона з 1976 р. після закінчення радіофізичного факультету КДУ ім. Т. Г. Шевченка та чотирьох років роботи в НДІ „Квант”. З того часу наукові дослідження та технологічні розробки в галузі фізичних методів технічного контролю зварних конструкцій стали справою його життя.

При його безпосередній участі розроблені і впроваджені технології та обладнання НК якості зварних з'єднань багатопарових труб на Харцызькому трубному та Виксунському металургійному заводах, розроблені технології і обладнання для контролю герметичності теплообмінних трубних систем та агрегатів космічного базування, технічного обстеження оболонок траншейних та наземних циліндричних резервуарів для зберігання продуктів нафтохімічного виробництва та ін.

Сфера наукових інтересів Поспайка Ю. М. – контроль герметичності, капілярний, магнітний, тепловий та інші види контролю, комплексний технічний контроль металоконструкцій та споруд. Він підготував більш як 150 публікацій – це наукові статті по НК тощо. Ювіляр – співавтор 5 книг, у тому числі двох книг багатотомного енциклопедичного видання „Машинобудування”.

Поспайко Ю. М. володіє широким спектром знань в галузі фізики НК, до його консультацій та оцінок завжди прислуховуються колеги та партнери. Він веде навчання та атестацію фахівців з НК, виконує роботи з сертифікації технології та продукції зварювального виробництва, готує державні та галузеві стандарти України. За його участю біля 15-ти міжнародних стандартів введені в дію в Україні. Його кваліфікація підкріплена сертифікатами фахівця III рівня з кількох видів контролю.

Юрій Миколайович був одним з організаторів УТ НКТД та ученим секретарем в перші роки його становлення. І сьогодні він член правління УТ НКТД та оргкомітетів конференцій, що проводить Товариство.

Вітаючи ювіляра, ми віримо в його сили, розум, доброту та готовність і далі працювати налюбимій професійній ниві, приносити нам насолоду від співпраці.

Бажаємо Вам, Юрію Миколайовичу, доброго здоров'я, невпинного професійного руху вперед, успіхів у всіх починаннях!

*Дирекція та співробітники ІЕС  
Правління Українського товариства НКТД  
Редколлегія та редакция журналу "ТДНК"*

## ПЛАН ПРОВЕДЕНИЯ МЕРОПРИЯТИЙ ПО НК В 2010 г.

### АПРЕЛЬ

**13–15.04. 11th National NDT Conference and Exhibition «Defectosopia 2010»**, Novy Smokovec, High Tatra, Slovak Republic.  
*Organizer:* Slovak Society for NDT.  
*Information:* [ssndt@ssndt.sk](mailto:ssndt@ssndt.sk), [www.ssndt.sk](http://www.ssndt.sk)

### ИЮНЬ

**7–11.06. 10-я Европейская конференция по неразрушающему контролю**, Москва, Экспоцентр.

*Организаторы:* Европейская федерация по неразрушающему контролю, Российское общество неразрушающего контроля и технической диагностики.

*Информация:* [info@ecndt2010.ru](mailto:info@ecndt2010.ru), [www.ecndt2010.ru](http://www.ecndt2010.ru)

### СЕНТЯБРЬ

**14–16.09. BINDT Conference NDT 2010**, Cardiff, UK. *Organizer:* British Institute of NDT.  
*Information:* [karen.cambridge@bindt.org](mailto:karen.cambridge@bindt.org), [www.bindt.org](http://www.bindt.org)

**22–24.09. 8-й Международный форум «Топливо-энергетический комплекс Украины: настоящее и будущее»**, Киев, Украина.

*Организатор:* Международный выставочный центр.

*Информация:* тел./факс: (+380 44) 201-11-57, [www.tech-expo.com.ua](http://www.tech-expo.com.ua), [silova@iec-expo.com.ua](mailto:silova@iec-expo.com.ua)

### ОКТЯБРЬ

**04–08.10. 18-я Международная конференция и выставка «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики»**, Ялта, Украина.

*Основной организатор:* УИЦ «НАУКА. ТЕХНИКА. ТЕХНОЛОГИЯ».

*Информация:* тел./факс: (+380 44) 573-30-40, e-mail: [office@conference.kiev.ua](mailto:office@conference.kiev.ua), [www.conference.kiev.ua](http://www.conference.kiev.ua)

### НОЯБРЬ

**15–19.11. Fall Conference and Quality Testing Show.** *Organizer:* American Society for NDT, Houston, Texas, USA.

*Information:* E-mail: [conferences@asnt.org](mailto:conferences@asnt.org); web: [www.asnt.org](http://www.asnt.org)

**23–26.11. 9-й Международный промышленный форум «МПФ-2010»**, в рамках которого состоится семинар по неразрушающему контролю, Киев, Украина.

*Организатор:* Международный выставочный центр при поддержке Минпромполитики Украины, Госпотребстандарта Украины, Украинского общества НК и ТД.

*Информация:* тел./факс (+380 44) 201-11-57, [www.tech-expo.com.ua](http://www.tech-expo.com.ua), [silova@iec-expo.com.ua](mailto:silova@iec-expo.com.ua)



**August 23-27, 2010**

**6-я Международная конференция по математическому моделированию технологии материалов (ММТ-2010)**

**Ariel Israel**



## ПАМ'ЯТІ КРИНИЧНОГО ПЕТРА ЯКОВИЧА



Перестало битися серце одного і з наукових основоположників НК та ТД у нафтогазовій промисловості, лауреата Державної премії України в галузі науки і техніки (2006 р.) колишнього завідувача відділу НВФ «ЗОНД» **Криничного Петра Яковича**.

Він народився 9 липня 1934 р. на Івано-Франківщині в сім'ї простих селян. Після закінчення радіотехнічного факультету Львівського політехнічного інституту працював на інженерних посадах підприємства військово-промислового комплексу у м. Йошкар-Ола Марійської АРСР, пізніше — в апараті управління машинобудування Станіславського раднархозу, старшим інженером та начальником відділу автоматизації Центральної науково-дослідної лабораторії виробничого об'єднання «Укрнафта» Міннафтопрому СРСР. Тут ним проведено перші дослідження методів та розроблено засоби неруйнівного контролю нафтогазопромислового та бурового обладнання. Під його керівництвом і безпосередньою участю були вперше створені пересувні лабораторії для виявлення дефектів у різьбах труб нафтового сортаменту.

Неруйнівний контроль став невід'ємною частиною життя Петра Яковича. Над цією проблемою він працював, перебуваючи на посадах завідувача лабораторії та завідувача відділу у Івано-Фран-

ківському відділі Всесоюзного науково-дослідного інституту нафтопромислових труб, а також провідного інженера у відділі неруйнівного контролю СКТБ «Надра» Івано-Франківського інституту нафти і газу і до виходу на пенсію — завідувача відділу Науково-виробничої фірми «Зонд».

На сьогоднішній день нафтогазова промисловість України та країн СНД користується багатьма технічними засобами та технологіями, які розроблені під керівництвом та за участю П. Я. Криничного.

Петро Якович не ставив собі за мету отримати вчену ступінь. Однак багато вчених вважали його своїм наставником. У доробку Криничного П. Я. більше 50-ти авторських свідоцтв та патентів на винаходи, більше 250-ти наукових публікацій.

Він нагороджений трьома золотими медалями ВДНГ СРСР за розроблення та впровадження засобів НК та технологій технічної діагностики нафтогазового обладнання тривалої експлуатації.

Покинув світ великий трудівник, висококваліфікований фахівець, умілий керівник, вірний товариш, хороший сім'янин і просто скромна людина. З глибокою скорботою сприйняла цю трагічну звістку наукова спільнота з НК та технічної діагностики. Важко виміряти біль втрати, а ще важче — змиритися з нею.

Світла пам'ять про Петра Яковича назавжди залишиться у серцях друзів та колег, усіх хто його знав, працював з ним, поважав і любив.

## ПАМ'ЯТІ РАДЬКО ВАДИМА ПЕТРОВИЧА



Ушел из жизни старший научный сотрудник отдела неразрушающих методов контроля Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины **Радько Вадим Петрович**.

В. П. Радько пришел в отдел неразрушающих методов контроля 27 лет тому назад уже сформировавшимся специалистом высокой

квалификации, пройдя путь от студента Киевского политехнического института до кандидата технических наук, старшего научного сотрудника. С его приходом отдел получил мощный импульс в решении теоретических и прикладных проблем неразрушающего контроля качества сварных соединений и изделий.

За время работы В. П. Радько в ИЭС при его непосредственном участии проведен большой комплекс исследований по обнаружению и оценке параметров дефектов сварных соединений, выполненных

контактной стыковой сваркой оплавлением, электронно-лучевой, сваркой полиэтиленовых труб и др.

Вадим Петрович руководил направлением, связанным с разработкой автоматизированных комплексов ультразвукового контроля ответственных конструкций с использованием средств вычислительной техники, а также разработкой методологии контроля изделий из пластмасс. Радько В. П. — автор 150 научных трудов, в том числе трех монографий и девяти изобретений, охватывающих такие области, как теория информации электро- и гидроакустика, ультразвуковая техника и др.

Большое внимание Вадим Петрович уделял научно-организационной и учебно-методической деятельности, был членом редколлегии журнала «Техническая диагностика и неразрушающий контроль».

Своей честностью, принципиальностью, скромностью В. П. Радько заслужил уважение и любовь сотрудников. Светлая память о Вадиме Петровиче всегда будет в сердцах его коллег и друзей.

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

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

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

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

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



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

### Обложка наружная, полноцветная

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

### Обложка внутренняя, полноцветная

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

### Внутренняя вставка

Полноцветная (разворот А3) (400×290мм) — 570\$  
 Полноцветная (200×290мм) — 340\$  
 Полноцветная (200×142мм) — 170\$  
 Реклама в разделе информации  
 Полноцветная (165×245мм) — 300\$  
 Полноцветная (165×120мм) — 170\$  
 Полноцветная (82×120мм) — 80\$

- Оплата в гривнях или рублях РФ по официальному курсу
- Для организаций-резидентов Украины цена с НДС и налогом на рекламу
- Статья на правах рекламы — 50% стоимости рекламной площади
- При заключении рекламных контактов на сумму, превышающую 1000\$, предусмотрена гибкая система скидок

### Технические требования к рекламным материалам

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

Подписано к печати 17.02.2010. Формат 60584/8. Офсетная печать.  
 Усл. печ. л. 9,04. Усл.-отт. 9,6. Уч.-изд. л. 9,2 + 3 цв. вклейки.  
 Цена договорная. Печать ООО «Фирма «Эссе».  
 03142, г. Киев, просп. Акад. Вернадского, 34/1.