

Учредители: Национальная академия наук Украины, Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Международная ассоциация «Сварка» (издатель)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор
Б. Е. ПАТОН

О. И. Бойчук, Э. Ф. Гарф,

Е. А. Давыдов, А. Т. Зельниченко,

Л. М. Лобанов, З. А. Майдан (отв. секр.),

А. Я. Недосека (зам. гл. ред.), Ю. Н. Посыпайко,

В. А. Троицкий (зам. гл. ред.), Е. В. Шаповалов

ИЭС им. Е. О. Патона, Киев, Украина

В. А. Стрыжало

Ин-т проблем прочности, Киев, Украина

Н. П. Алешин

МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, РФ

В. Л. Венгринович

Ин-т техн. физики, Минск, Республика Беларусь

М. Л. Казакевич

Ин-т физической химии, Киев, Украина

О. М. Карпаш

Ив.-Франк. нац. техн. ун-т нефти и газа, Украина

В. В. Ключев

ЗАО НИИИИ МНПО «Спектр», Москва, РФ

З. Т. Назарчук, В. Н. Учанин

Физ.-мех. ин-т, Львов, Украина

Н. В. Новиков

Ин-т сверхтвердых материалов, Киев, Украина

Г. И. Прокопенко

Ин-т металлофизики, Киев, Украина

В. А. Стороженко

Харьков. нац. ун-т радиоэлектроники, Украина

С. К. Фомичев

Нац. техн. ун-т Украины «КПИ», Киев

М. Г. Чаусов

Нац. ун-т биорес. и природопольз. Украины, Киев

В. Е. Щербинин

ИФМ УрО РАН, Екатеринбург, РФ

Адрес редакции

03680, Украина, г. Киев-150, ул. Боженко, 11

ИЭС им. Е.О.Патона НАН Украины

Тел./Факс: (044) 200-82-77, 205-23-90

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com

Научные редакторы

Е. А. Давыдов, Л. Ф. Харченко

Редакторы

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

Свидетельство

о государственной регистрации

КВ4787 от 09.01.2001.

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

СОДЕРЖАНИЕ

Интервью с директором ООО «НДТ Системз энд сервисез
Украина» В.Л. Найдой..... 3

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

СТРИЖАЛО В.О., СТАСЮК С.З. Экспертна оцінка технічного
стану технологічних трубопроводів з водневомісним середовищем.... 7

НЕДОСЕКА С.А., НЕДОСЕКА А.Я. Возникновение трещин на
внутренней поверхности трубопроводов в условиях эксплуа-
тации при высоких температурах. Сообщение 2. Напряжение в
стенке трубы 14

**НАУМЕНКО В.П., КУЧЕР Н.К., КРАВЧУК Р.В.,
ДАНИЛЬЧУК Е.Л., ПРИХОДЬКО Р.П.** Разработка мето-
дики определения зависимости развития трещин в тонколи-
стовых (обшивочных) материалах авиационных конструкций от
размеров образцов 18

ТРОИЦКИЙ В.А., КАРМАНОВ М.Н., ШЕВЧЕНКО И.Я.
Неразрушающий контроль объектов повышенной опасности..... 28

**ЯВОРСЬКИЙ І.М., ЮЗЕФОВИЧ Р.М., КРАВЕЦЬ І.Б.,
МАЦЬКО І.Й., СТЕЦЬКО І.Г.** Розробка вібродіагностичної
системи для визначення дефектів промислового обладнання
з використанням методів нестационарної статистичної обробки
вібраційних та акустичних коливань 36

ЛУЧКО И.И., КОВАЛЬЧУК В.В., ВОЗНЯК О.М. Техническая
диагностика транспортных сооружений при изменяющихся
нагрузках и температурах 42

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

ТОРОП В.М., ПЕРЕПИЧАЙ А.А. Оценка граничной сейсмостой-
кости гермопроходок энергоблока № 2 Ровенской АЭС 49

ВОРОНКИН Е.Ф., МИХАЙЛОВ С.Р. Перспективы применения
селенида цинка для цифровой радиографии 53

ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ

68-я Ежегодная Ассамблея Международного
Института сварки IIW 2015 58

Українському товариству неруйнівного контролю та технічної
діагностики – 25 років 59

О Центре сертификации Украинского общества
неразрушающего контроля и технической диагностики..... 61

Семинар з неруйнівного контролю 63

ИЗДАНИЕ ПОДДЕРЖИВАЮТ:

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

Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики

Founders: The National Academy of Sciences of Ukraine, The E. O. Paton Electric Welding Institute NASU, International Association «Welding» (Publisher)

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief

B. E. PATON

O. I. Boichuk, E. F. Garf, E. A. Davydov, A. T. Zelnichenko, L. M. Lobanov, Z. A. Maidan (Executive Secretary)

A. Ya. Nedoseka (Deputy Editor-in-Chief),
Yu. N. Posypaiko,

V. A. Troitskii (Deputy Editor-in-Chief),

E. V. Shapovalov

PWI of the NASU, Kiev, Ukraine

V. A. Stryzhalo

Institute for Problems of Strength, Kiev, Ukraine

N. P. Aleshin

N.E.Bauman MSTU, Moscow, RF

V. L. Vengrinovich

Institute of Applied Physics, Minsk, Belarus

L. M. Kazakevich

Institute of Physical-Chemistry, Kiev, Ukraine

O. M. Karpash

Ivano-Frankovsk National Technical Institute of Oil and Gas, Ukraine

V. V. Kluev

CJOSC NIIIB MNPO «Spektr», Moscow, RF

Z. T. Nazarchuk, V. N. Uchanin

Physico-Mechanical Institute, Lvov, Ukraine

N. V. Novikov

Institute for Superhard Materials, Kiev, Ukraine

G. I. Prokopenko

Institute of Metal Physics, Kiev, Ukraine

V. A. Storozhenko

Kharkov National University of Radioelectronics, Ukraine

S. F. Fomichev

KPI National Technical University of Ukraine, Kiev

M. G. Chausov

National University of Bioresources and Nature Management of Ukraine, Kiev

V. E. Sherbinin

IMF UrD RAS, Ekaterinburg, RF

Address

The E. O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine,

11, Bozhenko str., 03680, Kyiv, Ukraine

Tel./Fax: (38044) 200-82-77, 200-23-90

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com

Scientific editors

E. A. Davydov, L. F. Kharchenko

Editors

L. N. Gerasimenko, D. I. Sereda, T. V. Ushtina

State Registration Certificate

KV 4787 of 09.01.2001.

All rights reserved.

«Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchiy kontrol»

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

CONTENTS

Interview with V.L.Naida, Director of OJSC «NDT Systems and Services Ukraine»..... 3

SCIENTIFIC-TECHNICAL

STRIZHALO V.O., STASJUK S.Z. Expert evaluation of technical condition of process piping with hydrogen-containing media..... 7

NEDOSEKA S.A., NEDOSEKA A.Ya. Crack initiation on pipeline inner surface in high-temperature service. Information 2. Stresses in pipe walls..... 14

NAUMENKO V.P., KUCHER N.K., KRAVCHUK R.V., DANILCUK E.L., PRIKHODKO R.P. Development of the procedure for determination of the dependence of crack propagation in sheet (sheath) materials of aircraft structures on the dimensions of the studied samples..... 18

TROITSKII V.A., KARMANOV M.N., SHEVCHENKO I.Ya. Non-destructive testing of higher hazard objects..... 28

YAVORSKA I.M., YUZEFOVICH R.M., KRAVETS I.B., MATSKO I.J., STETSKO I.G. Development of vibrodiagnostic system for determination of industrial equipment defects with application of methods of non-stationary statistical treatment of vibration and acoustic oscillations 36

LUCHKO I.I., KOVALCHUK V.V., VOZNYAK O.M. Technical diagnostics of transport facilities at variable loads and temperatures..... 42

INDUSTRIAL

TOROP V.M., PEREPICHAJ A.A. Evaluation of seismic stability boundary of sealing passages in power generating unit #2 of Rovno NPS 49

VORONKIN E.F., MIKHAILOV S.R. Prospects for application of zinc selenide for digital radiography 53

NEWS AND INFORMATION

68th Annual Assembly of the International Institute of Welding – IIW 2015 58

Ukrainian society for nondestructive testing and technical diagnostics is 25 years old..... 59

On the Certification Center of Ukrainian Society for Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics 61

Seminar on NDT 63

JOURNAL PUBLICATION IS SUPPORTED BY:

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

Ukrainian Society for Non-Destructive Testing and Technical Diagnostic

Интервью с директором ООО «НДТ Системз энд сервисез Украина» В.Л. Найдой

Компания ООО «НДТ Системз энд сервисез Украина» приобретает все большую известность как надежный партнер в области создания автоматизированных систем ультразвукового контроля. По итогам работы в 2013–2014 гг. в Украине предприятие награждено международным сертификатом «Экспортер года» как крупный экспортер оборудования автоматизированного УЗ контроля. Главным потребителем продукции компании является металлургическая промышленность.

Специалисты предприятия принимают активное участие в проводимых выставках и конференциях по неразрушающему контролю как в Украине, так и в Европе.



В.Л. Найда — директор
ООО «НДТ Системз энд сервисез Украина»

Владимир Львович, каковы истоки появления Вашей компании в Украине?

Фирма ООО «НДТ Системз энд сервисез Украина» была создана в октябре 2012 г. на базе отдела автоматизированных средств ультразвукового контроля ОКТБ Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины.

Почему и как это произошло?

На протяжении всей деятельности отдела в ОКТБ ИЭС им. Е.О.Патона, а отдел был создан 1984 г. постановлением Президиума АН УССР, мы испытывали постоянные трудности при выполнении работ по крупным контрактам из-за недостатка оборотных средств на изготовление оборудования. Так, например, в 2003 г. был выигран тендер на поставку Выксунскому металлургическому заводу шести установок для УЗ контроля продольных сварных швов и концевых участков труб (в рамках проекта «Северный поток»). Это был большой и интересный проект.

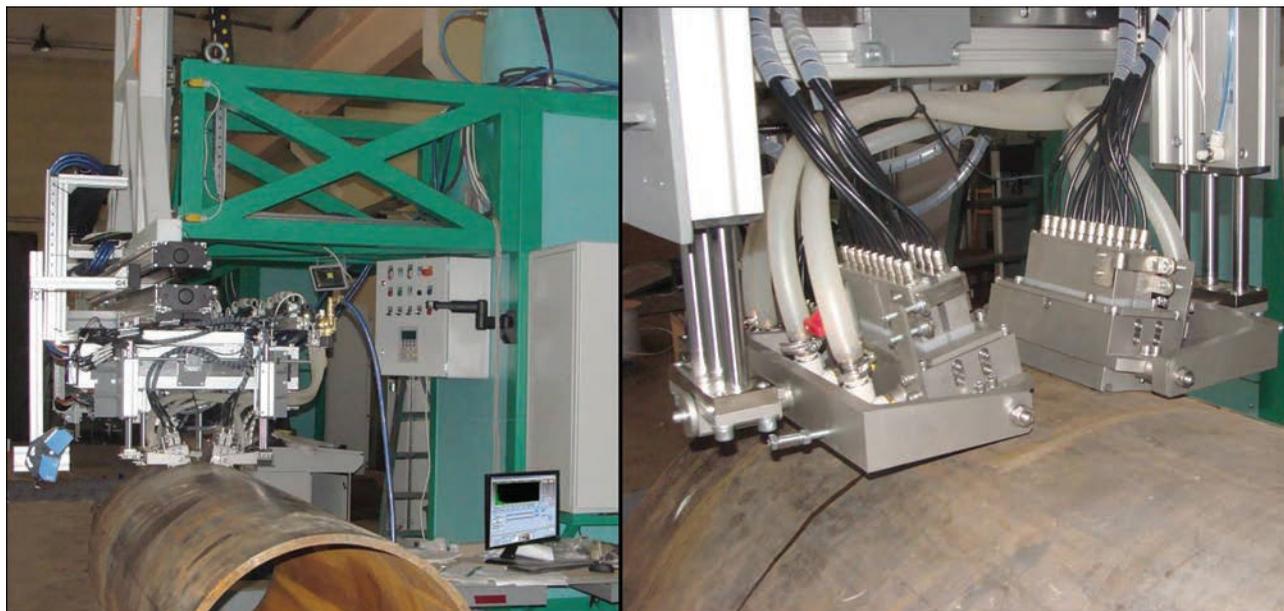
Только благодаря личному участию академика Б.Е. Патона нам удалось решить вопрос, связанный с получением банковской гарантии на авансовый платеж по этому контракту, а затем успешно выполнить работы на Выксунском металлургическом заводе. Все оборудование, поставленное по этому контракту, успешно эксплуатируется и в настоящее время. Позже, уже в 2012 г., мы практически заключили контракт с Волжским трубным заводом на поставку двух установок для автоматизированного УЗ контроля (АУЗК) бесшовных труб по новой технологии (с применением матричных фазированных решеток), но оказалось, что выполнить его мы не можем все по той же причине — невозможность получения банковской гарантии.

И как же дальше развивались события?

То ли случай, то ли некоторое везение, но в этот момент в крупной не-



Презентация нашей новой технологии АУЗК бесшовных труб на международной трубной выставке в Дюссельдорфе, 2014 г.



Установка НК 362МВ для АУЗК концевых участков труб большого диаметра, поставлена на ОАО «Выксунский металлургический завод», 2013 г.

мецкой фирме «NDT Systems & Services GmbH» сменился собственник. Фирма известна в мире как поставщик оборудования для АУЗК листового проката, рельсов в условиях их массового производства, а также услуг по внутритрубной диагностике магистральных нефте- и газопроводов.

Будучи человеком весьма энергичным, он решил расширить сферу своей деятельности за счет трубной тематики, понимая, что в мире работают свыше 500 трубных заводов и контроль качества их продукции является очень важной сферой бизнеса. По данному вопросу были проведены две встречи с Б.Е. Патоном. Учитывая все обстоятельства, было принято решение о создании в Украине специализированного предприятия по автоматизированному УЗ контролю. Учредителем данного предприятия стала фирма «NDT Systems & Services GmbH».

Изменились ли основные направления деятельности? И какой сейчас кадровый состав?

В свое время, будучи отделом ОКБ ИЭС им. Е.О. Патона, мы занимались не только оборудованием по УЗ контролю труб, но и разработками по УЗ контролю железнодорожных колес. Также были реализованы различные проекты в сфере атомной энергетики и оборонного комплекса.

В течении десяти лет мы поставляли на атомные станции Украины вихретоковые зонды и в последующем передали это производство государственному предприятию, входящему в состав НАЭК «Энергоатом».

На сегодняшний день наша деятельность сосредоточена на АУЗК труб (как сварных, так и бесшовных) и железнодорожных колес с ориентацией на российский рынок. К сожалению, украинский рынок оборудования для УЗК в некотором смысле был нами упущен, так как мы были заняты реализацией очень крупных проектов в России. Но наша попытка наладить работу в Украине продолжается. Например, недавно мы провели презентацию наших технологий и оборудования по контролю бесшовных труб в компании «Интерпайп» и передали технико-коммерческое предложение на поставку такого оборудования.

Что касается коллектива. На сегодняшний день в компании работает 21 человек. Она является комплексным подразделением, т.е. включает конструкторский отдел, программистов, акустиков, специалистов по разработке систем управления и автоматики, слесарей-механиков, электромонтажников. Нами выполняется полный цикл как по разработке оборудования, так и по изготовлению, наладке и пуску его у заказчика. Основные направления деятельности сохранились и добавилось новое — изготовление УЗ преобразователей.

Чем это обусловлено?

Налаживание контактов с немецкими партнерами позволило получить нам доступ к новым материалам, которые необходимы для изготовления УЗ преобразователей. Например, композитная керамика позволяет изготавливать УЗ преобразователи ничем не отличающиеся от лучших зарубежных аналогов. Мы организовали у себя производственный участок для их изготовления, закупили необходимое оборудование и к настоящему времени уже являемся серьезным конкурентом ведущим зарубежным фирмам, работающим в этой области.

Сегодня, например, у нас в стадии переговоров контракт с фирмой «Foerster» на поставку УЗ преобразователей для НК листового проката, поставлена небольшая партия преобразователей немецкой фирме «Laubinger». Имеются небольшие заказы от украинских предприятий.

Какие наиболее успешные проекты были реализованы Вами в последние годы?

Очень успешными для нас были 2012–2014 г. Мы разработали для заводов России и Украины пять установок: две — для Волжского трубного завода для АУЗК бесшовных труб, одну — для Выксунского трубного завода для контроля концевых участков труб большого диаметра (под «Южный поток») и две установки для Харцызского трубного завода (УЗК концевых участков труб и УЗК сварного шва). Четыре установки были успешно запущены, а одна (для Харцызского трубного завода) из-за событий на Донбасе до сих пор не поставлена. Имеем сейчас из-за этого серьезные проблемы.

Насколько усовершенствовались технологии УЗК в этих разработках?

В этих проектах абсолютной новинкой стала разработка и изготовление оборудования для УЗК бесшовных труб. Это связано с тем, что современный уровень нефтегазового комплекса обуславливает необходимость удовлетворения очень высоким требованиям к качеству и надежности потребляемой трубной продукции. Новые месторождения эксплуатируются на все большей глубине в условиях более низких температур. Все это поднимает планку требований к качеству.

Ведущие мировые фирмы «ExxonMobile», «Chevron», «Shell» разработали новые стандарты, в которых оговорены требования по АУЗК бесшовных труб с учетом продольных и поперечных дефектов, а также так называемых «косых» дефектов с углами 22, 45 и 67° по обе стороны относительно образующей трубы. А сейчас, в 2015 г., фирма «ExxonMobile» потребовала обнаруживать «косые» дефекты через каждые 11°.

Это была принципиально новая и сложная для нас работа, которую мы выполняли совместно с французской фирмой «Socomate», поставившей дефектоскопическую аппаратуру. Две такие установки были изготовлены для Волжского трубного завода: одна для концевых участков труб, вторая — для тела трубы. В этих проектах нами впервые была применена технология матричных фазированных решеток. Разработана принципиально новая конструкция акустических блоков с применением полиуретановой мембраны, скользящей непосредственно по поверхности трубы. Сегодня можно с уверенностью сказать, что аналогов такого оборудования в мире нет. Наша установка НК 380Л успешно прошла квалификационные испытания по стандартам фирмы «Shell» и ей выдан соответствующий сер-



Установка НК 368ВЛ для АУЗК концевых участков бесшовных труб, ОАО «Волжский трубный завод», 2014 г.



Установка АУЗК на заводе компании «Laubinger» во время приемочных испытаний, 2014 г.



Сертификат «Экспортер года»

тификат. В этом же году была проведена сертификация нашего оборудования специалистами американской компании «EchonMobile».

По этой же тематике мы участвовали в тендере, который проводила компания «Valoures Mannesmann» для своего завода в Дюссельдорфе. Но, к сожалению, этот тендер мы проиграли компании GE.

В настоящее время, не имея оборудования, которое позволяет обнаруживать «косые» дефек-

ты, сложно получить заказы от основных мировых потребителей труб. Я предполагаю, что в ближайшее время повсеместно обновятся стандарты, которые ужесточат требования к АУЗК.

За успешную реализацию контрактов в 2013 и 2014 гг. наша компания была отмечена Внешнеторговой палатой Украины — вручением сертификата «Экспортер года».

Попав в новую среду «обитания», мы поняли, что и по профессиональной подготовке, и по ответственному отношению к делу, и по качеству изготовленного оборудования мы не уступаем лучшим зарубежным фирмам, а по срокам изготовления оборудования — превосходим их. Мы освоили современные рациональные подходы к расчету и планированию стоимости контрактов.

Хочу также рассказать о необычном проекте, который был выполнен для немецкой фирмы «Laubinger». Компания «Laubinger», которая изготавливает порталы, движущиеся каретки и другие механические устройства решила попытаться самостоятельно выйти на рынок Германии со своим оборудованием АУЗК. Они изготовили механическую часть установки для контроля труб, мы поставили свой дефектоскоп и акустические преобразователи. Сейчас установка успешно эксплуатируется на одном из трубных заводов «Valoures Mannesmann». В будущем мы сможем поставлять наши специализированные преобразователи для этой установки.

Владимир Львович, в чем на Ваш взгляд сила небольших фирм в конкурентной борьбе с брендами?

Я думаю вот в чем. Крупные компании сами по себе очень инертны. У них есть стабильные заказы и они не очень ориентированы на изменения. Они не хотят делать новое, пока у них покупают старое. А небольшие фирмы, чтобы выжить, стараются как можно быстрее внедрять новые технологические решения. Пример тому — наше оборудование для АУЗК труб на Волжском трубном заводе.

Благодарим Вас, Владимир Львович, за интересную информацию и желаем Вам дальнейших успехов!

Интервью записали А. Зельниченко и В. Липодаев



ЕКСПЕРТНА ОЦІНКА ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТРУБОПРОВІДІВ З ВОДНЕВОВМІСНИМ СЕРЕДОВИЩЕМ

В.О. СТРИЖАЛО, С.З. СТАСЮК

Ін-т проблем міцності НАНУ, 01014, Київ-14, вул. Тимірязєвська, 2. E-mail: ips@ipp.kiev.ua

Розглянуто методичні підходи до експертної оцінки технічного стану технологічних трубопроводів, по яких транспортується горючі і вибухонебезпечні середовища, що містять від 60 до 90 % об. водню в суміші з рідкими чи пароподібними вуглеводами, сірководнем та іншими компонентами. Показано, що довготривале напрацювання сталі 12CrMo19 5 (DIN 17176) в конструкції технологічних трубопроводів не призвело до змін структури і деградації механічних властивостей металу за термін служби від 180 000 до 245 000 год в умовах дії водневовмісного середовища високих параметрів. У той же час зі збільшенням строків експлуатації понад 245 000 год ініціюються процеси водневої корозії зварних швів. Бібліогр. 12, табл. 4, рис. 9.

Ключові слова: технологічні трубопроводи, водневовмісне середовище, механічні властивості металу трубопроводів

В умовах каталітичного риформінгу і гідрочищення технологічне обладнання працює у контакті з середовищем із вмістом водню за температурами 260...530 °С і тиску 2,5...6,6 МПа. Довготривала дія водню на метал в таких умовах призводить до водневої корозії, яка проявляється в зміні структури металу, погіршенні фізико-механічних властивостей. І це, у свою чергу, підвищує небезпеку виникнення руйнування.

Надійність роботи технологічних трубопроводів гарантується своєчасним контролем їх технічного стану, суворим виконанням технологічного режиму, а також дотриманням вимог нормативних документів щодо нагляду за безпечною експлуатацією. Експертиза промислової безпеки об'єктів підвищеної небезпеки на нафтопереробних заводах, що відпрацювали проектний строк служби, передбачає експертне обстеження (технічне діагностування), яке включає [1, 2]:

- неруйнівний контроль (НК) традиційними методами, який дозволяє своєчасно виявити початкову стадію руйнування елемента від дефектів металургійного чи експлуатаційного походження;
- оцінку залишкового ресурсу на основі розрахунків на міцність.

Залишковий ресурс технологічного трубопроводу визначається сумарним напрацюванням від моменту контролю його технічного стану до переходу в граничний стан [3], за яким його подальша експлуатація неприпустима чи недоцільна, або відновлення його роботоспроможності неможливе чи недоцільне. Оскільки трубопровід являє собою об'єкт, що складається з окремих елементів (труб, з'єднаних зварюванням, фасонних деталей, фланців, арматури тощо), граничний стан усіх його елементів не може бути досягнений одночасно.

До такого об'єкту застосовується поняття призначений ресурс (або призначений строк служби), який відраховується від моменту контролю його технічного стану і на протязі якого забезпечується роботоспроможність основних елементів – труб і зварних з'єднань.

З урахуванням особливості експлуатації гідрогенізаційного обладнання, коли можливе протікання деградаційних процесів під дією домінуючого фактору пошкодження – водневої корозії металу – ресурс (строк служби) подовжується поетапно. А саме подальший строк служби (або час до наступного технічного діагностування) встановлюється на основі отриманих під час експертного обстеження результатів, а також аналізу властивостей матеріалу, напрацювання якого відбувалося в умовах впливу водневовмісного середовища високих параметрів. Тому при експертному обстеженні такого обладнання проводяться лабораторні дослідження з метою виявлення змін фізико-механічних властивостей і структури металу, які могли виникнути внаслідок тривалої експлуатації або порушення нормального режиму роботи.

Періодичний контроль технічного стану технологічних трубопроводів гідрогенізаційних установок проводиться планово в процесі експлуатації і в терміни, встановлені нормативно-технічними документами [1, 2]. Контролю технічного стану з проведенням лабораторних досліджень властивостей металу піддають трубопроводи, які виготовлені з вуглецевих і низьколегованих марганцовистих сталей після їх напрацювання 120000 год, і з низьколегованих хромомолібденових сталей – 150000 год [1].

Наведемо результати контролю технічного стану технологічних трубопроводів реакторних бло-



ків трьох установок каталітичного риформінга ЛГ-35-11/300 нафтопереробних заводів. Під час експертного обстеження для лабораторних досліджень надійшли «котушки», вирізані з прямих ділянок трубопроводів. Виготовлювач усіх установок – Магдебурський завод важкого машинобудування (Німеччина). Матеріал трубопроводів за даними заводських сертифікатів – сталь марки 12CrMo19 5 DIN 17176 [4]. Вітчизняним аналогом труб з цієї сталі є труби зі сталі марки 15X5M ГОСТ 550–75 [5], хімічний склад яких відповідає вимогам ГОСТ 20072–74 [6].

На час обстеження фактичне напрацювання трубопроводів в умовах водневовмісного середовища (водень з бензином) склало 180 000 год за тиском 3,8 МПа і температури 420 °С (трубопровід 1), 200 000 год за тиском 3,8 МПа і температури 400 °С (трубопровід 2) і 245 000 год за тиском 3,8 МПа і температури 425 °С (трубопровід 3). Зварні шви були виконані ручним дуговим зварюванням електродами типу Cr5MoV TGL 11776 з використанням технології термооброблення: попереднє нагрівання до 350...400 °С, відпалювання після зварювання за температури 700...725 °С на протязі 90 хв. і охолодження на повітрі.

Результати аналізу хімічного складу наведені в табл. 1. Приведені дані сертифікатів підприємства виробника труб, а також норми відповідності складу досліджуваних марок. За даними таблиці видно, що за складом вуглецю, карбідотворюючих елементів, а також домішків сірки і фосфору матеріал труб повністю відповідає вимогам стандарту на сталь марки 12CrMo19 5 DIN 17176 [4]. Крім того, виявлений вміст елементів в металі зварних швів труб 1, 2 та 3 вказує на те, що використані електроди вносять свою частку в утворення аустенітної структури шва.

Металографічний аналіз, проведений з метою вивчення можливих змін мікроструктури основного металу і зварних з'єднань труб внаслідок тривалої експлуатації, показав наступне.

Труба 1. Метал забруднений неметалеви ми включеннями, багато складних окисів типу шпинелей FeO·MnO. Спостерігаються одиничні карбонітриди титану, ланцюжки нітридів алюмінію, дисперсні частки сульфідів заліза й марганцю, на усіх перерізах труби присутні оксиди точкові. Метал зварного шва, як і основний метал труби, забруднений неметалевими включеннями. Структура основного металу характерна для хромомолібденових сталей – феритно-перлітна (рис. 1, а). Склад карбідів зернистого перліту (сорбіту) – карбіди типу $Me_{23}C_6$ {Cr,Mo(Fe)}₂₃C₆ (або {Cr,Mo}₂₃C₆) та Me_7C_4 {Cr,Mo}₇C₄ (або {Cr,Mo(Fe)}₇C₄) [7]. Характеристики мікроструктури наведені в табл. 2.

Зварний шов виконаний багат шаровим зварюванням (у п'ять проходів). Для макроструктури шва характерно чітке формування колоній кристалів дендритів з направленим зростанням від границі розділу з основним металом вглиб до центру шва (рис. 1, б). В зоні сплавлення сформувався перехідний прошарок, обумовлений міграцією

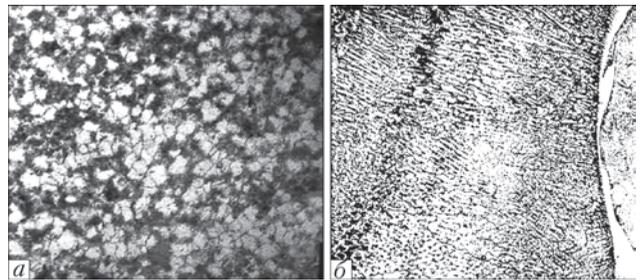


Рис. 1. Феритно-перлітна структура основного металу (а) і дендритна структура металу шва (б) трубопроводу 1 (напрацювання 180000 год), ×100

Таблиця 1. Результати контрольного аналізу хімічного складу труб технологічних трубопроводів реакторних блоків установок ЛГ-35-11/300, мас. %

Джерело даних	C	Cr	Mo	Mn	Si	S	P	Ni	Cu	W	Ti	V
Результати дослідження:												
труба 1	0,15	5,04	0,54	0,390	0,355	<0,005	0,015	0,12	0,175	0,005	0,003	0,005
труба 2	0,09	5,10	0,56	0,406	0,39	0,025	<0,01	0,008	0,106	<0,01	0,005	0,003
труба 3	0,11	5,15	0,57	0,410	0,40	0,024	0,032	10,7	0,06	<0,01	0,025	<0,01
метал шва труби 1	0,11	23,2	9,52	1,98	0,33	<0,01	<0,01	56,2	<0,02	–	0,07	0,03
метал шва труби 2	0,09	14,8	0,259	0,875	0,70	0,012	0,017	5,65	0,106	<0,01	0,014	0,016
метал шва труби 3	0,10	15,3	0,161	0,989	0,38	<0,003	<0,005	6,98	0,095	–	<0,005	–
12CrMo20.5 TGL 6918	0,08...0,15	4,5...6,5	0,45...0,65	0,30...0,60	0,30...0,50	≤0,035	≤0,035	–	–	–	–	–
12CrMo19 5 DIN 17176	0,08...0,15	4,0...6,0	0,45...0,65	0,30...0,60	≤0,50	≤0,02	≤0,025	–	–	–	–	–
Сталь 15X5M ГОСТ 550	<0,15	4,5...6,0	0,45...0,60	<0,50	<0,50	<0,025	<0,03	<0,6	<0,20	<0,30	<0,03	<0,05
Електрод типа ЭА-1а марки ОЗЛ-8 ГОСТ 10052–75 (шов 3)	0,08	20,0	–	1,4	0,58	<0,02	<0,030	8,8	–	–	–	–
Електрод марки АНЖР-1 ГОСТ 10052–75 (шов 1)	До 0,10	23,0...26,0	8,50...11,0	1,50...2,50	До 0,05	0,015	0,020	Основа	–	–	До 0,05	–
<i>Примітка.</i> Склад елементів в металі зварного шва труб 1 і 3 вказує на використання при зварюванні електродів відповідно до типу Э-08Х25Н60М10Г2 марки АНЖР-1 ГОСТ 10052–75 [7], що формують аустенітну структуру шва												



вуглецю з менш легованої складової (основний метал труби) в складову, що збагачена карбидоформуючими елементами (метал шва). Виникнення такого дифузійного прошарку характерно в з'єднаннях перлітних (феритних) сталей з аустенітними швами.

Структура зони термічного впливу (ЗТВ) представлена на рис. 2, а характеристики структури окремих ділянок цієї зони – в табл. 2, в якій також приведені значення мікротвердості основного металу, металу шва та окремих ділянок ЗТВ. Видно, що мікротвердість зварного шва (3650...3745 МПа) перевищує в середньому на 50 % мікротвердість основного металу.

Труба 2. В основному металі присутня велика кількість мікропор. Мікроструктура металу являє собою феритно-карбідну суміш і бейніт відпуску (рис. 3). Зварне з'єднання виконано стиковим багатопрохідним одностороннім швом. При заварюванні кореня шва і наступним накладанням шарів використані різні електроди, що відобразилося в відмінностях мікроструктури, а також в різній кількості феритної складової в окремих ділянках зварного шва (рис. 3). В металі шва також присутні дефекти, що утворилися внаслідок забруднення шва шлаковими включеннями. Мікроструктура верхньої частини зварно-

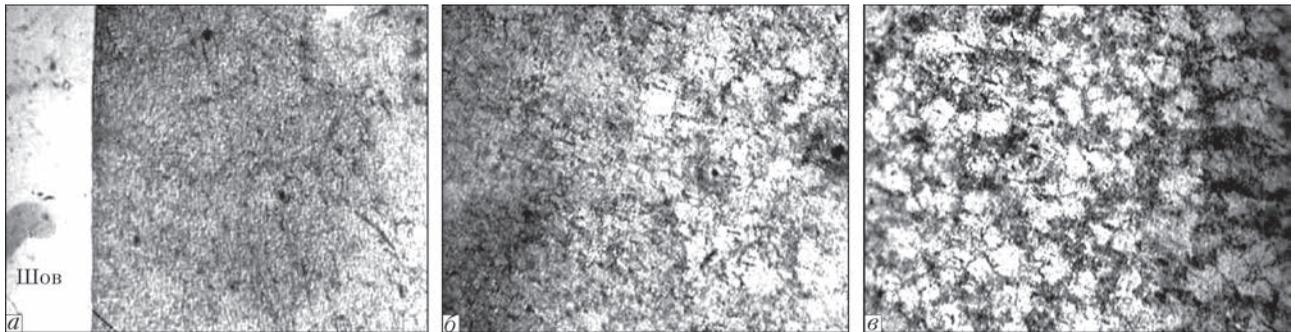


Рис. 2. Фрагменти мікроструктури металу ЗТВ трубопроводу 1: а – шов з ділянками неповного розплавлення і перегріву; б – ділянки нормалізації і неповної перекристалізації; в – ділянка рекристалізації

Таблиця 2. Характеристики структури основного металу і ЗТВ трубопроводів 1 і 3 із сталі марки 12CrMo195

Місце дослідження	Протяжність ділянок, мм	Розмір зерна, бали		Співвідношення фериту і перліту, %		Дисперсність перліту (сорбіту)		Мікротвердість НВ, МПа		Неметалеві включення: тип, бал	
		ферит	перліт (сорбіт)	ферит	перліт (сорбіт)	бал	розмір карбідів, мкм	ферит	перліт (сорбіт)		
Труба 1 з напрацюванням 180 000 год											
Основний метал	–	8 (9)	9 (8)	40	60	1,2	до 20, 40	2010	2370	ОТ1а, С16, 2б, ОС 2а, НТ 1а, СП FeO·MnO·SiO(Cr ₂ O ₃), шлакові включення	
Зона сплавлення	0,01...0,015	–	10 (11)	–	100	1	до 25	–	–		
ЗТВ*	ділянка 1	0,12...0,15	–	6	–	100	1	до 25, 40	–		2710
	ділянка 2	~0,35...0,40	–	6–5	0 (~3)	100 (~97)	1	до 25	–		2520
	ділянка 3	~0,40...0,60	9 (10)	8 (9)	~10	~90	1	до 25	2210		2840
	ділянка 4	~0,80	10–11(8)	11–10(8)	~15	~85	1, 2	до 25, 40	2180	2370	
ділянка 5	~1,0	8 (9)	9 (8)	~20–25	~80–75	1, 2	до 25, 40	2080	2450		
Шов (центр)	–	–	–	–	–	Дендрити		верх: 3650	корінь 370	ОТ1а, ОТ4а, FeO·MnO·SiO ₂ , шлак	
Труба 3 з напрацюванням 245 000 год											
Основний метал	–	–	7, 8	–	100	1, 2	до 20, 40	–	1940...2240	FeO·MnO	
Зона сплавлення	0,01...0,015	–	13, 14	–	100	–	–	–	3440		
ЗТВ*	ділянка 1	0,05...0,08	–	7, 6 (12)	–	100	1	до 20	–		3150...3250
	ділянка 2	0,8...1,0	–	6 (7, 8)	–	100	1, 2	до 20, 40	–		3440...3650
	ділянка 3	0,8...0,9	–	11	–	100	1	до 20	–		3910...4180
	ділянка 4	0,6...0,7	–	11 (10)	40...50	60...50	2	до 20	–	2290...2350	
ділянка 5	1,0	–	9 (8)	–	–	2	до 20	–	2350		
Шов (центр)	–	–	8, 9 (7)	–	–	Дендрити		верх: 3440	корінь: 2900...3000		

*Ділянки ЗТВ: 1 – неповного розплавлення; 2 – перегріву; 3 – нормалізації; 4 – неповної перекристалізації; 5 – рекристалізації

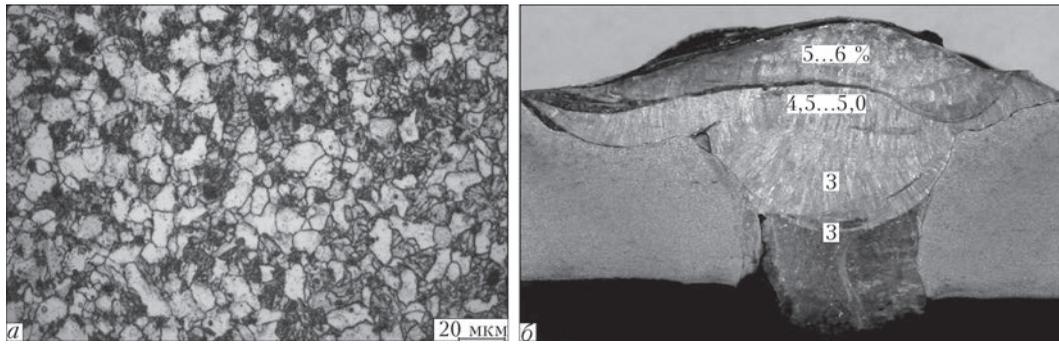


Рис. 3. Мікроструктура основного металу (а) і макроструктура зварного з'єднання (б) трубопроводу 2 (напрацювання 200 000 год) го шва і кореня шва представлені на рис. 4. Фрагменти мікроструктури ЗТВ – на рис. 5.

Труба 3. Основний метал і зварний шов по відношенню до наявності пор і неметалевих включень можна вважати чистим: пори поодинокі, неметалеві включення являють собою невеликі за розміром шпінелі типу FeO·MnO круглої форми діаметром 0,02...0,05 мм. В металі шва наявні поодинокі включення карбідів, розміром 10...15 мкм у діаметрі. Мікроструктура основного металу складається з 100 % дрібнозернистого перліту, який виник внаслідок високого відпуску (сорбіт відпуску). Склад карбідів подібний до таких труби 1. Зварний шов виконаний у три проходи. Мікроструктура металу шва і окремі фрагменти ЗТВ представлені на рис. 6. Мікротвердість структурних складових основного металу по товщі труби знаходиться у межах 1940...2129 МПа із зовнішнього боку і 2129...2240 МПа з внутрішнього. Мікротвердість металу шва перевищує мікротвердість основного металу в середньому на 50 %.

Таким чином, отримані при металографічних дослідженнях дані свідчать про те, що структура металу труб не зазнала змін внаслідок високотемпературного напрацювання 180000, 200000 та 245000 год в умовах дії воднево-

вмісного середовища. Ознаки водневої корозії відсутні.

Контроль механічних властивостей матеріалу досліджуваних труб виконували відповідно до вимог стандартів і нормативних документів (НД). Комплекс механічних характеристик отримано за кімнатної і робочої температур. Результати наведені в табл. 3. Як показали випробування, характеристики міцності і пластичності, а також показники твердості не зазнали змін внаслідок напрацювання труб і за своїми значеннями відповідають вимогам стандартів і НД. Відмітимо, що досліджені зварні шви трубопроводів рівноміцні основному металу за всіх температур випробування.

Вплив напрацювання на роботоспроможність матеріалу труб не може бути оцінений без додаткових даних про опір крихкому руйнуванню і, зокрема, про критичну температуру крихкості. Під критичною температурою крихкості розуміють температуру, за якої відбувається зміна характеру руйнування матеріалу від в'язкого до крихкого. У якості показника приймається ударна в'язкість, що залежить від енергії, витраченої на руйнування, а по виду зламу – доля в'язкої складової. Зразки основного металу і зварних з'єднань трубопро-

Таблиця 3. Механічні характеристики матеріалу труб с напрацюванням 180 000, 200 000 та 245 000 год

Температура випробувань, °С	Границя міцності σ_n , МПа	Границя плинності $\sigma_{0,2}$, МПа	Відносне видовження δ , %	Відносне звуження ψ , %	Твердість HB
Труба 1 з напрацюванням 180 000 год					
20	592	420	27,8	77,8	191/216
420	445	318	20,8	74,3	
Труба 2 з напрацюванням 200 000 год					
20	587	420	31,8	77,0	
400	470	359	15,1	79,3	
Труба 3 з напрацюванням 245 000 год					
20	642	529	22,6	79,5	167/169
425	453	355	20,7	73,3	
525	400	370	21,2	79,9	
Стандарт DIN 17176 на сталь марки 12CrMo19 5 [4]					
20	590...740	390	17	62	175...220
450	480	385	15	76	
500	430	350	18	82	
ГОСТ 550-75 на сталь марки 15X5M-Y [5]					
20	600	420	16	65	Не більше 235

Примітки. 1. За вимогою ИТН-93[8] для зварного шва сталі 15X5M-Y величина HB не більше 270 од. 2. За коною наведені значення HB для зварних швів

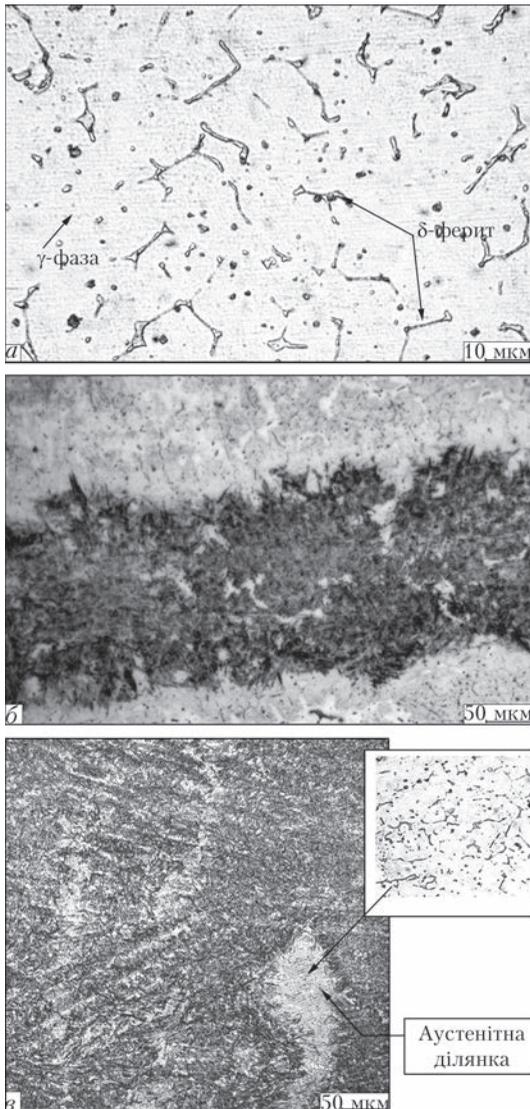


Рис. 4. Мікроструктура верхньої частини зварного шва (а) з мартенситно-бейнітними прошарками (б), кореня шва в трубопроводу 2 (напрацювання 200 000 год)

водів піддавали випробуванням на ударний згин у заданому низькотемпературному інтервалі. Випробування проводили відповідно до вимог стандартів ГОСТ 9454–78 [9], ГОСТ 6996–66 [10]. За отриманими даними будували графіки залежності ударної в'язкості і в'язкої складової в зламі від температури випробувань, з яких відповідно до заданих критеріальних значень (КЗ) ударної в'язкості ($KCV = 34 \text{ Дж/см}^2$) і в'язкої складової

Таблиця 4. Результати випробувань на ударний згин зразків труби 3 з напрацюванням 245 000 год

Температура випробувань, °С	Основний метал	
	Ударна в'язкість KCV , Дж/см ²	В'язка складова B , %
450	170/49	100/55
20	154/11	100/60
20	152/7	100/10
0	120/30	100/35
-10	100/28	90/30
-20	90/21	70/23
-20	80/18	60/18
-30	70/20	52/14
-30	62/22	54/12
-40	60/18	48/6
-40	53/16	40/8
-50	55/-	30/-
-60	38/-	12/-

Примітка. За косяно наведено дані для зварних швів

в зламі (50 %) визначали критичну температуру крихкості. Наведемо тільки результати випробувань зразків трубопроводу 3 (табл. 4) через те, що його напрацювання в умовах експлуатації складо найбільшу величину – 245 000 год.

Графіки залежності ударної в'язкості і в'язкої складової в зламі зразків від температури випробувань представлені на рис. 7.

Аналіз даних показав, що ударна в'язкість основного металу має достатньо високі показники і повністю відповідає вимогам ГОСТ 550–75 [5] і ПНАЕ Г-7-002–86 [11], за якими для матеріалу, границя плинності якого за температури 20 °С знаходиться в межах від 402 до 549 МПа, КЗ ударної в'язкості має бути не менше 74 Дж/см². Ударна в'язкість зварних з'єднань досліджуваного трубопроводу значно менше такої основного металу, проте знаходиться в межах вимог ПБ 03-576-03 [12], а саме для зварних з'єднань сталей мартенситного класу значення KCV не має бути нижчим 35 Дж/см² при 20 °С та 20 Дж/см² при –20 °С.

Вивчення впливу напрацювання на критичну температуру крихкості (T_k) показало, що за критеріальним значенням KCV і в'язким волокном в зламі 50 % значення T_k основного металу складає –72 °С і –32 °С відповідно, у той же час T_k звар-

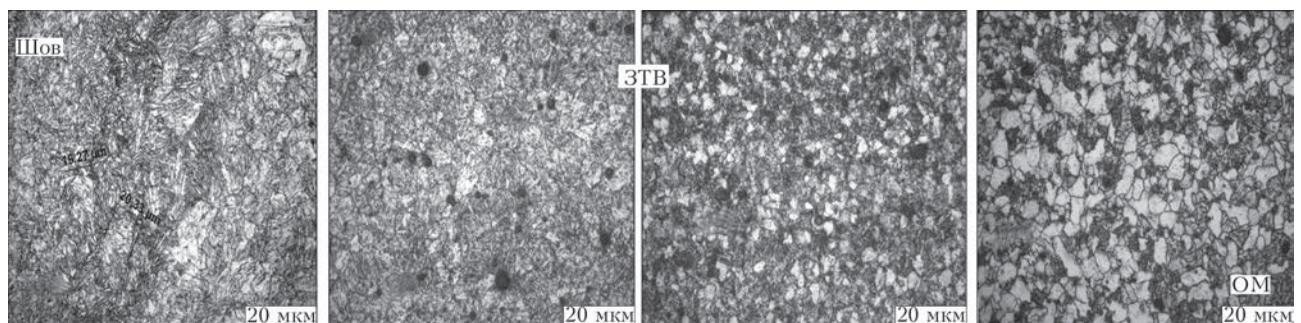


Рис. 5. Фрагменти мікроструктури металу ЗТВ трубопроводу 2 (напрацювання 200 000 год) (ОМ – основний метал)

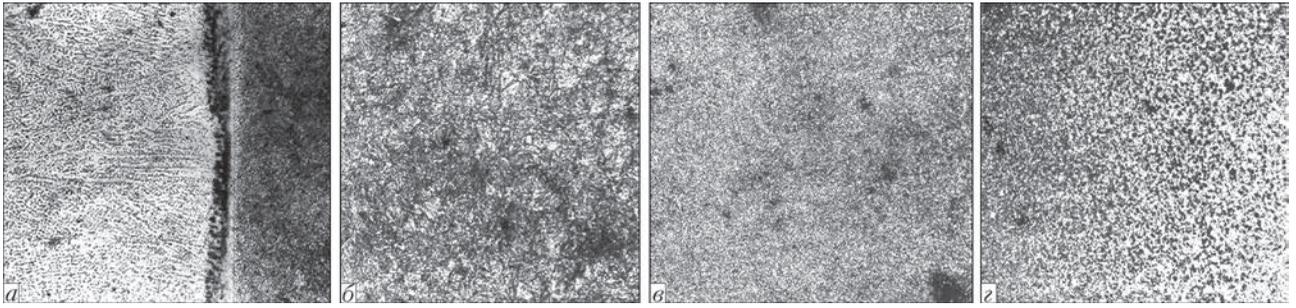


Рис. 6. Мікроструктура металу шва (а) і фрагменти мікроструктури ЗТВ (б-г) трубопроводу 3 (напрацювання 245 000 год), $\times 100$

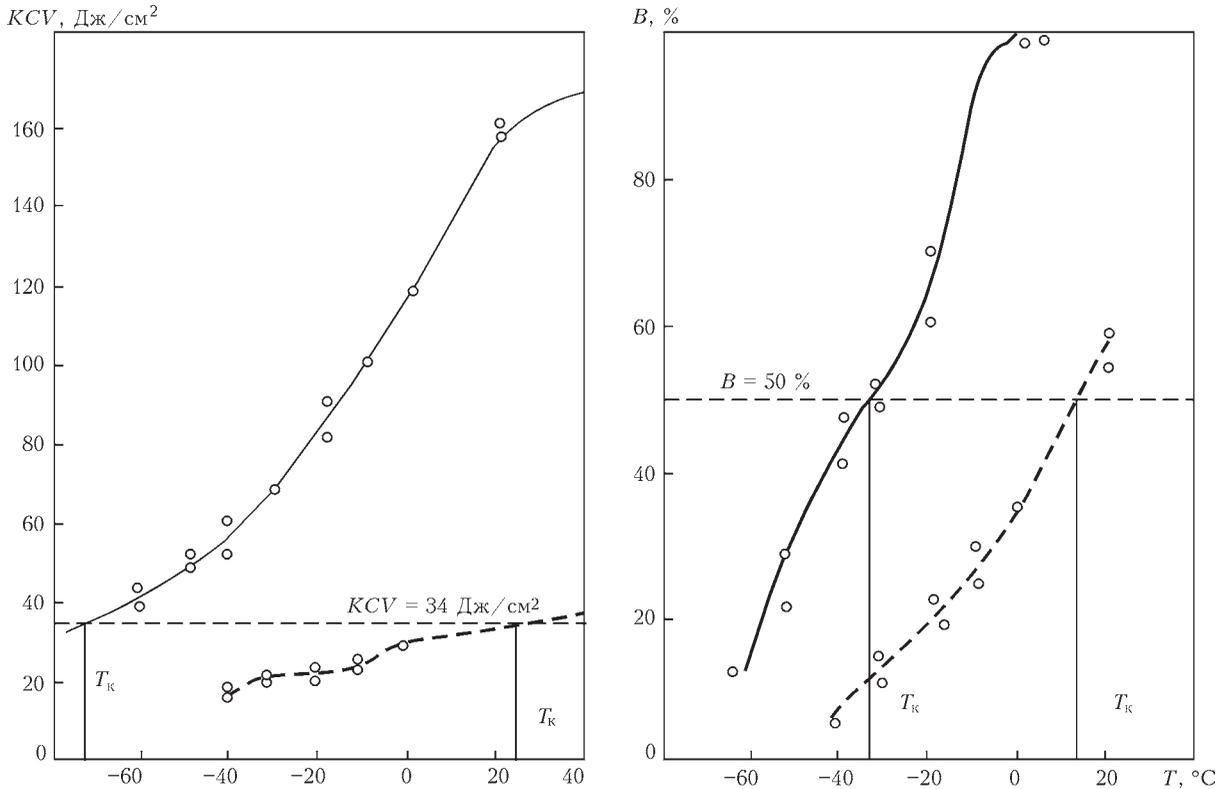


Рис. 7. Ударна в'язкість KCV (зліва) основного металу (суцільна лінія), зварного шва (штрихова лінія) і величина в'язкої складової B (справа) в зламі зразків в залежності від температури випробування трубопроводу 3 (напрацювання 245 000 год)

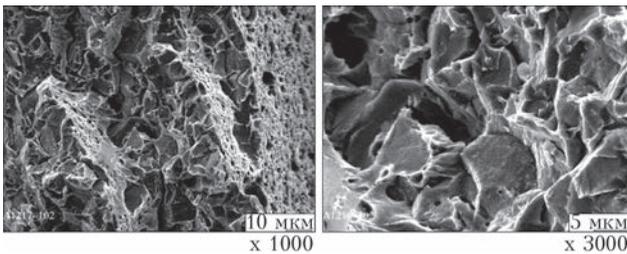


Рис. 8. Структура поверхні руйнування зразка основного металу трубопроводу 3 після випробувань на ударний згин при $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ в зоні переходу від в'язкого руйнування до квазікрихкого

них з'єднань знаходиться в області позитивних температур і складає 25 і $13\text{ }^{\circ}\text{C}$ відповідно.

Структура зламу зразків основного металу і зварного з'єднання, зруйнованих при температурах, близьких до T_k , представлена на рис. 8 і 9. Поверхня руйнування зразка основного металу (рис. 8) має волокнисту і кристалічну складові у співвідношенні одна до одної приблизно 50% . Видно, що руйнування відбувалося при розділенні металу по тілу зерна

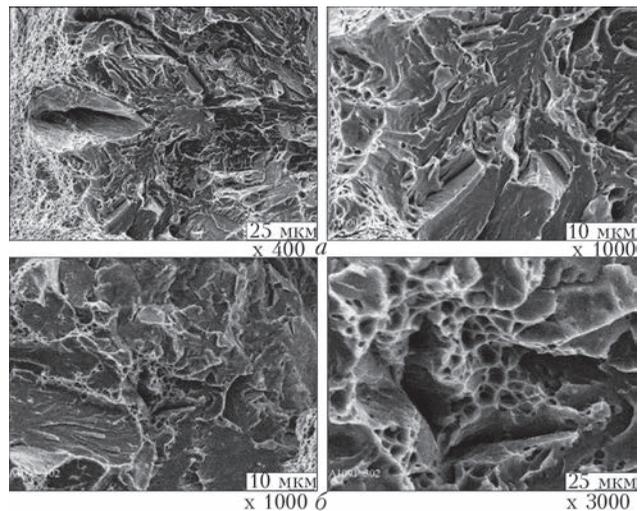


Рис. 9. Структура поверхні зламу зразка зварного з'єднання трубопроводу 3 після випробувань на ударний згин при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (з 50% в'язкової складової): а – зона зародження тріщини, сформованої при розділенні металу шляхом злиття мікропор і перехід від в'язкого руйнування до квазікрихкого; б – квазікрихке руйнування в зоні розповсюдження тріщини



шляхом квазісколу з характерними фасетками, розділеними між собою гребнями відриву. Руйнування поверхні такого виду характеризується як квазікрихке. Поверхня зламу зразка зварного з'єднання, зруйнованого за 20 °С, дуже неоднорідна (рис. 9). Спостерігаються ділянки різної морфології. В зоні зародження тріщини, у вістря надрізу, знаходяться ділянки в'язкого руйнування, утворені шляхом злиття мікропор. До них безпосередньо прилягає ділянка з рельєфом внутрішньозернистого руйнування квазісколом і гребнями відриву, на якому зустрічаються фасетки сколу з характерним рівчаковим визерунком. В зоні розповсюдження тріщини виникли такі самі ділянки квазікрихкого руйнування.

Висновки

Довготривале напрацювання сталі 12CrMo19 5 DIN 17176 в конструкції технологічних трубопроводів реакторного блоку установок каталітичного риформінгу ЛГ-35-11/300 не призвело до змін структури і деградації механічних властивостей металу за термін служби від 180 000 до 245 000 год в умовах дії водневомісного середовища високих параметрів. У той же час із збільшенням строків експлуатації до 245 000 год ініціюються процеси водневої корозії зварних швів, які проявляються у різкому зниженні ударної в'язкості і зміщенні критичної температури крихкості в область позитивних температур.

Незважаючи на те, що основний метал задовольняє усім вимогам НД, у зв'язку з підвищенням температури в'язко-крихкого переходу зварних швів за певних умов експлуатації може статися крихке руйнування ділянки трубопроводу. З метою запобігання виробничих інцидентів під час технічних наглядів чи експертних обстежень трубопроводів реакторного блоку установок каталітичного риформінгу ЛГ-35-11/300 гідравлічні чи пневматичні випробування на міцність повинні проводитись за температури не менше 15 °С. В штатних умовах експлуатації (відповідно до рег-

ламентних режимів) внаслідок високого рівня в'язких властивостей матеріалу небезпека руйнування за робочими температурами (від 400 до 425 °С) відсутня.

Крім цього, з метою розширення заходів по запобіганню раптових відмов обладнання доцільно під час планово-попереджувальних ремонтів здійснювати заміну зварних швів, з використанням зварювальних матеріалів і технологій зварювання відповідно до даної марки сталі.

1. *НПАОП 0.00-6.09-10.* Порядок проведення огляду, випробування та експертного обстеження обладнання установок гідрогенізаційних процесів у нафтопереробному, нафтохімічному і хімічному виробництвах. – Введ. 14.04.2010 (Державний реєстр Держгіпромнагляду України).
2. *ДСТУ 4046–2001.* Обладнання технологічне нафтопереробних, нафтохімічних і хімічних виробництв. Технічне діагностування. Загальні технічні вимоги. – Введ. 27.07.2001
3. *ДСТУ 2389–94.* Технічне діагностування та контроль технічного стану. Терміни та визначення. – Введ. 01.01.1995
4. *Wegst C. W.* Verlag Stahlschlüssel GmbH, Dusseldorf, 1995.
5. *ГОСТ 550–75.* Трубы стальные бесшовные для нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. – Введ. 01.01.1977.
6. *ГОСТ 20072–74.* Сталь теплоустойчивая. Технические условия. – Введ. 01.01.1976.
7. *ГОСТ 10052–75.* Электроды покрытые металлические для ручной дуговой сварки высоколегированных сталей с особыми свойствами. Типы. – Введ. 01.01.1977, актуализованый 01.03.2014 (Каталог державних стандартів).
8. *ИТН-93.* Инструкция по техническому надзору, методам ревизии и отбраковки оборудования нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств: Утв. Госгортехнадзором 16.05.94, Волгоград. – 1993. – 153 с.
9. *ГОСТ 9454–78.* Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах. – Введ. 01.01.1990, актуализованый 01.03.2014. – (Каталог державних стандартів).
10. *ГОСТ 6996–66.* Сварные соединения. Методы определения механических свойств. – Введ. 01.01.1967, актуализованый 01.01.2005 (Каталог державних стандартів).
11. *ПНАЭ Г-7-002–86.* Правила и нормы в атомной энергетике. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.
12. *РБ «Рекомендации по устройству и безопасной эксплуатации технологических трубопроводов».* Утверждено приказом Ростехнадзора от 27.12.2012 № 784.

The paper analyzes methodological approaches to expert evaluation of technical condition of process piping for transportation of hot and explosive media, containing from 60 up to 90 vol.% of hydrogen in a mixture with liquid or vapourized carbohydrates, hydrogen sulfide and other components. It is shown that long-term service of 12CrMo195 steel (DIN 17186) in process piping system did not lead to changes in structure or degradation of mechanical properties of metal during the service period from 180 000 up to 245 000 hours under the impact of high parameter hydrogen-containing medium. At the same time, processes of hydrogen corrosion of welds are initiated at extension of service period above 245 000 hours. 12 References, 4 Tables, 9 Figures.

Keywords: process piping, hydrogen-containing medium, mechanical properties of piping metal

Надійшла до редакції
28.10.2015



ВОЗНИКНОВЕНИЕ ТРЕЩИН НА ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТРУБОПРОВОДОВ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Сообщение 2. Напряжения в стенке трубы*

С.А. НЕДОСЕКА, А.Я. НЕДОСЕКА

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

В Сообщении 2 рассмотрен характер и величины температурных и остаточных напряжений, возникающих при внезапном приложении высокой температуры к внутренней стенке трубы. Показано влияние динамической составляющей напряжений, вызванной внезапным приложением тепловой нагрузки к внутренней стенке трубы. Установлено, что высокий градиент распределения температуры в направлении радиуса в начальные моменты времени приводит к появлению сжимающих напряжений, превышающих предел текучести материала на внутренней поверхности трубы. Последнее вызывает пластические деформации и, как следствие, остаточные растягивающие напряжения. Образовавшиеся напряжения могут быть достаточными для возникновения трещин, ориентированных вдоль образующей трубы. Библиогр. 5, рис. 5.

Ключевые слова: тепловая нагрузка, температурные и остаточные напряжения, сжимающие напряжения, остаточные растягивающие напряжения

В Сообщении 1 рассмотрен характер температурного поля и величины температур, возникающих при внезапном приложении тепловой нагрузки к внутренней поверхности трубы [1]. В этой части публикации рассмотрим температурные напряжения, вызванные этим полем и последствия его воздействия на материал трубы. Как было показано [1], возникающие трещины распространяются внутрь стенки трубы на небольшую глубину и имеют достаточно большую протяженность вдоль ее образующей (рис. 1).

Фото, представленные на рис. 1, показывают, что сеть трещин является достаточно густой, что свидетельствует о наличии равномерного поля растягивающих напряжений в области образования этих трещин.

Рассмотрим механизм возможного образования поля растягивающих напряжений на внутренней стенке трубы. Напряженное состояние элемента трубы при воздействии на него неравномерно распределенной температуры описывается в плоском варианте известным уравнением [2]:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\varphi r) \right] = -\alpha_{\theta} E \frac{\partial \theta}{\partial r}, \quad (1)$$

где φ – функция напряжений, кг/см; θ – температура, °С; α_{θ} – коэффициент линейного расширения материала трубы, 1/°С; E – нормальный модуль упругости, МПа.

Решив приведенное дифференциальное уравнение и приняв во внимание выражения для на-

пряжений через функцию φ ($\sigma_r = \varphi/r$; $\sigma_{\theta} = d\varphi/dr$), получим формулы для напряжений σ_r и σ_{θ} (см. рис. 2). При этом соблюдены граничные условия, когда $\sigma_r = 0$ при $r = a$ и b – на внутреннем и наружном радиусе трубы. Тогда с учетом того, что динамическая составляющая температуры в стенке трубы описывается уравнением [1, 4]:

$$\theta = \frac{Q_a}{\pi \lambda_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\alpha_n^2 \alpha_k J_0(\alpha_n a) J_0(\alpha_n r)}{(\alpha_n^2 + h^2) b^2 J_0^2(\alpha_n b)} \exp(-\alpha_n^2 \alpha_k t),$$

выражения для расчета напряжений в направлении окружности и радиуса будут иметь вид:

$$\sigma_{\theta} = \alpha_{\theta} E \sum_{n=1}^{\infty} \gamma_n \left\{ -J_0(\alpha_n r) + \frac{J_1(\alpha_n r)}{\alpha_n r} + \frac{J_1(\alpha_n a)}{\alpha_n a} - \frac{r^2 + a^2}{b^2 - a^2} \frac{b^2}{r^2} \left[\frac{J_1(\alpha_n a)}{\alpha_n a} - \frac{J_1(\alpha_n b)}{\alpha_n b} \right] \right\},$$

$$\sigma_r = \alpha_{\theta} E \sum_{n=1}^{\infty} \gamma_n \left\{ -\frac{J_1(\alpha_n r)}{\alpha_n r} + \frac{J_1(\alpha_n a)}{\alpha_n a} - \frac{r^2 - a^2}{b^2 - a^2} \frac{b^2}{r^2} \left[\frac{J_1(\alpha_n a)}{\alpha_n a} - \frac{J_1(\alpha_n b)}{\alpha_n b} \right] \right\}. \quad (2)$$

Здесь общий член суммы обозначен через γ_n и входит как множитель в выражения для напряжений (2):

* Сообщение 1 см. в журнале «Техническая диагностика и неразрушающий контроль». – 2015. – №3. – С. 11–14

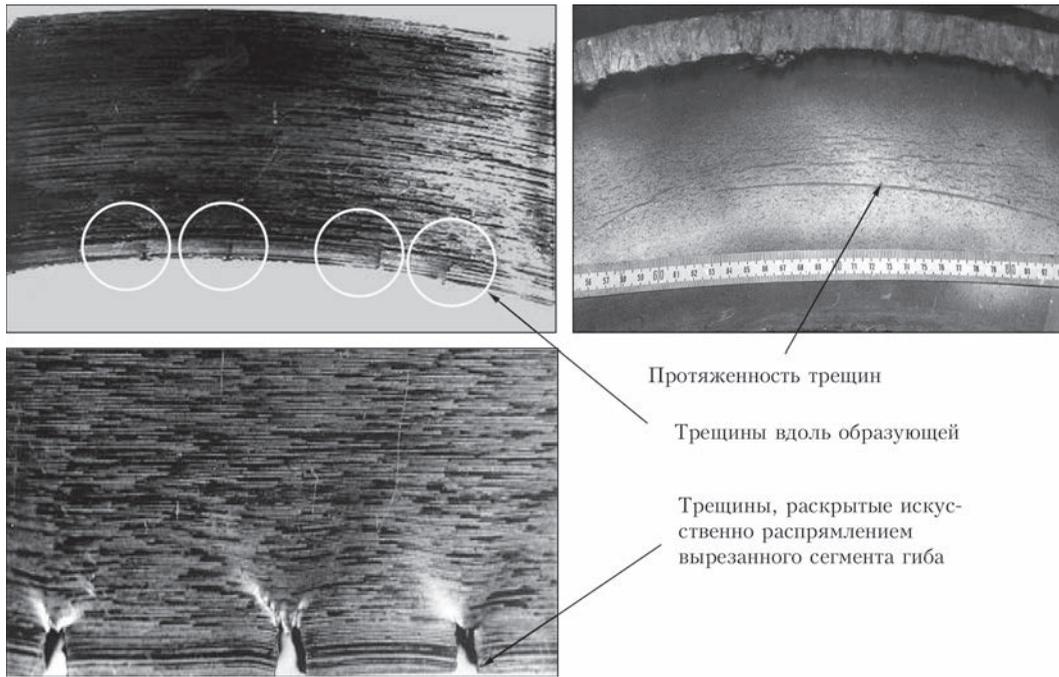


Рис. 1. Трещины на внутренней стенкегиба трубы диаметром 159×16 мм из стали 12Х1МФ после 180 тыс. ч наработки (по данным Л.А. Латушенко, Змиевская ГЭЦ)

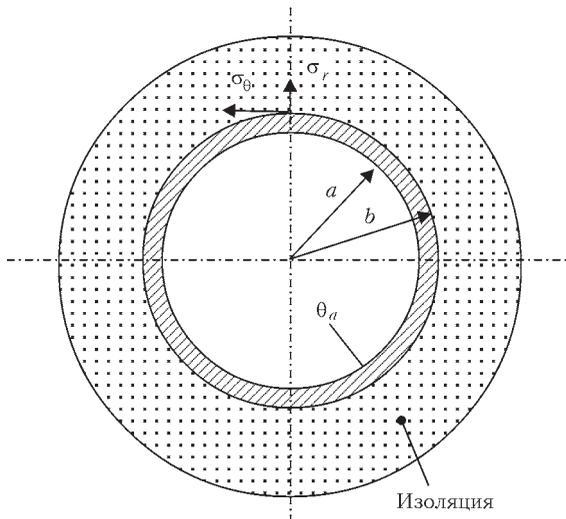


Рис. 2. Схематическое изображение трубы паропровода в изоляционном пакете

$$\gamma_n = \frac{Q}{\pi\lambda_0} \frac{\alpha_n^2 a_k \exp(-\alpha_n^2 a_k t) J_0(\alpha_n a_0)}{(\alpha_n^2 + h^2) b^2 J_0^2(\alpha_n b)}$$

В выражения (2) входят также функции Бесселя нулевого и первого порядка первого рода для действительного переменного J_0 и J_1 . Значения этих функций легко вычисляются на персональных компьютерах и не представляют трудностей для расчетов. Коэффициенты α_n определяются [1] как положительные корни характеристического уравнения:

$$\alpha_n J_1(\alpha_n b) + h J_0(\alpha_n b) = 0.$$

Напряженное состояние для элемента трубы, подсчитанное по формулам (2), приведено на рис. 3.

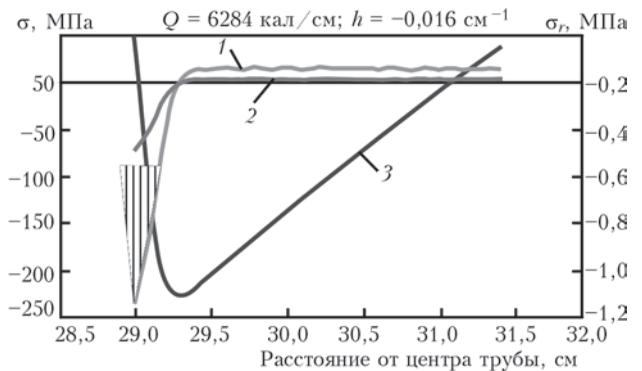


Рис. 3. Напряжения в стенке трубы через 0,1с после приложения температуры (штриховкой показана область пластических деформаций)

Как видно из рисунка, напряжения на внутренней поверхности трубы превосходят предел текучести материала, который после наработки материала в течение более 200 тыс. ч равен $\sigma_T \approx 0,7 \sigma_b = 60$ МПа [3]. Показанная штриховкой на рисунке область пластических деформаций распространяется внутрь трубы на незначительную (в данном случае 2 мм) глубину. Хотя этого вполне достаточно для возникновения растягивающих напряжений, способствующих образованию неглубоких трещин. Расчеты показывают, что даже незначительное динамическое приложение температуры к стенке трубы вызывает большие внутренние напряжения. Так, 80 °С, мгновенно приложенные к внутренней стенке трубы, вызывают окружающие сжимающие напряжения, равные 180 МПа в области на расстоянии 0,1 мм от границы стенки.

Остаточные напряжения в стенке трубы подсчитаем по формулам (3) подобным приведенным выше, но вместо температуры воспользуемся ве-



личной пластических деформаций, возникших при нагреве стенки трубы:

$$\sigma_{\theta,o} = -\varepsilon_0 E \left\{ \left[1 + \frac{1}{2\beta^2 r^2} \right] \exp[-\beta^2(r^2 - a^2)] + \frac{1}{2\beta^2 a^2} \right\} - \frac{\varepsilon_0 E}{2\beta^2(b^2 - a^2)} \left[-\left(\frac{b^2}{a^2} + \frac{b^2}{r^2} \right) + \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) \times \exp(-\beta^2(b^2 - a^2)) \right] - \frac{\varepsilon_0 E}{\beta^2 a^2}, \quad (3)$$

$$\sigma_{r,o} = -\varepsilon_0 E \frac{\exp[-\beta^2(r^2 - a^2)]}{2\beta^2 r^2} - \frac{\varepsilon_0 E}{2\beta^2 a^2} \frac{b^2}{b^2 - a^2} \left[\left(\frac{a^2}{r^2} - 1 \right) + \frac{a^2}{b^2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) \times \exp(-\beta^2(b^2 - a^2)) \right] - \frac{\varepsilon_0 E}{\beta^2 a^2}.$$

В формулах (3) коэффициент β характеризует крутизну распределения пластических деформаций в стенке трубы. Величина $\varepsilon_0 E$ равна пределу текучести материала в остывшем состоянии. В данном случае эта величина равна 60 МПа и $\beta = 0,5 \text{ см}^{-2}$ [4].

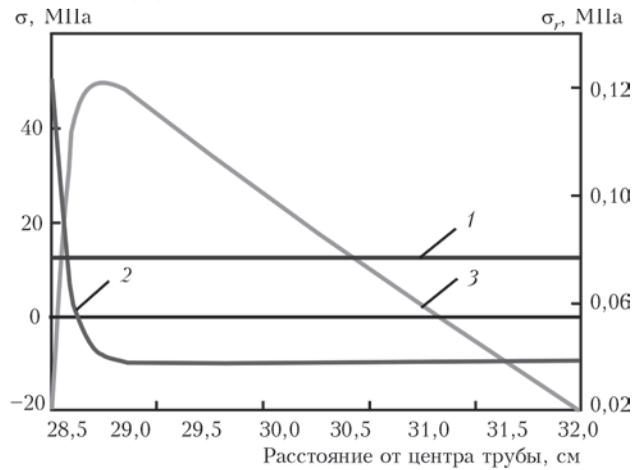


Рис. 4. Остаточные напряжения в стенке трубы, образованные после выравнивания температуры (1 – рабочие напряжения при давлении 22 ат); 2 – $\sigma_{\text{напр}}$; 3 – $\sigma_{\text{ост}}$

Необходимо также учесть, что при формировании поля остаточных напряжений, связанных со снижением и выравниванием температур по сечению трубы с течением времени, последние приведут к образованию остаточных напряжений на момент формирования равных или меньших предела текучести материала трубы. На рис. 4 представлены остаточные напряжения в стенке трубы, связанные с формированием на момент спустя 0,1 с от начала процесса нагрева трубы. В последующие моменты времени будет расширяться лишь область распространения остаточных напряжений в глубину трубы. Однако это уже существенно не повлияет на величину остаточных напряжений, учитывая, что их поле формирует начальный, максимальный уровень.

Анализируя графики, приведенные на рис. 4, можно сделать вывод о том, что остаточные напряжения, действующие по окружности, достигают предела текучести материала, а значит, могут способствовать появлению трещин по образующей трубы. Радиальные напряжения незначительны и ими можно пренебречь.

Одновременно с динамической составляющей температурного поля действует и квазидинамическая составляющая, которая растет от нулевого значения вплоть до достижения стационарного состояния. В этом случае основным фактором, влияющим на напряженное состояние стенки трубы, является интенсивность теплоотвода, определяемая качеством изоляции наружной поверхности трубы. Следует обратить внимание на влияние этого фактора. На рис. 5 показаны два варианта теплоотвода при установившемся тепловом поле. Как видим, напряженное состояние в стенке трубы существенно зависит от теплоотвода. Так, в случае достаточно надежной изоляции трубы ($h = 0,003 \text{ см}^{-1}$) напряжения в ее стенке невелики и не превосходят 4,5 МПа (рис. 5, справа). Повышение интенсивности теплоотвода за счет ухудшения качества изоляции вызывает увеличение напряжений. В данном случае при $h = -0,016 \text{ см}^{-1}$ напряжения в окружном направлении увеличи-

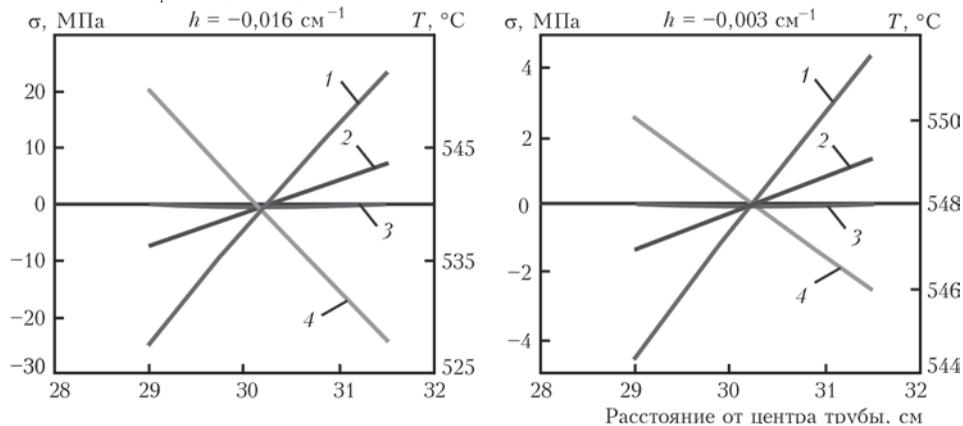


Рис. 5. Напряжения в стенке трубы при стационарном температурном поле: 1 – σ_{θ} ; 2 – σ_r ; 3 – σ ; 4 – θ



ваются до 25 МПа (рис. 5, слева). Дальнейшее усиление теплопровода за счет обдува наружной поверхности трубы с полностью нарушенной изоляцией может еще более повысить напряжения в ее стенке. Напряжения в окружном направлении являются сжимающими и не достигают больших величин при хорошем качестве изоляции. При нарушении изоляции возросшие напряжения могут привести к появлению пластических деформаций в зоне своего действия и, как следствие, появлению дополнительной области растягивающих напряжений.

При построении графиков (рис. 5) использованы формулы расчета напряжений в трубах при стационарном температурном поле [1, 2]:

$$\sigma_r = \alpha_T E \frac{\theta_a - \theta_b}{2} \left[\frac{\ln\left(\frac{r}{a}\right)}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} - \frac{b^2}{r^2} \frac{r^2 - a^2}{b^2 - a^2} \right],$$

$$\sigma_\theta = \alpha_T E \frac{\theta_a - \theta_b}{2} \left[\frac{1 + \ln\left(\frac{r}{a}\right)}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} - \frac{b^2}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) \right].$$

Здесь θ_a – температура на внутренней стенке трубы, °С; α_0 – коэффициент линейного температурного расширения материала, 1/°С; h – коэффициент теплоотвода, см⁻¹.

Выводы

При внезапном динамическом термоударе по внутренней поверхности трубы возникает временное температурное поле с высоким градиентом, вызывая большие сжимающие напряжения. Последнее приводит к появлению пластических деформаций в узкой области внутренней стенки

Information 2 deals with the nature and magnitude of temperature and residual stresses, arising at sudden application of high temperature to pipe inner wall. The influence of dynamic component of stresses, induced by sudden application of thermal load to pipe inner wall, is shown. It is found that high gradient of temperature distribution in the direction of the radius at initial moments of time, induces compressive stresses, exceeding material yield point on pipe inner surface. The latter creates plastic deformations and, consequently, residual tensile stresses. The formed stresses can be sufficient for initiation of cracks, oriented along the pipe generatrix. 5 References, 5 Figures.

Keywords : thermal load, temperature and residual stresses, compressive stresses, residual tensile stresses

трубы и, как следствие, к остаточным растягивающим напряжениям, создающим условия для образования трещин.

Возникающее при динамическом термоударе температурное поле достаточно быстро, на протяжении времени до 30 с, уменьшается. Тем не менее, за данный период успевают создаться условия для возникновения и развития трещин. Одновременно с динамическим полем температур и напряжений растет и начинает оказывать влияние на процессы, протекающие в материале трубы, вторая, квазидинамическая составляющая температурного поля. Эта часть поля действует вплоть до насыщения и появления установившегося стационарного температурного поля.

Градиент распределения температуры при стабильном стационарном состоянии теплового поля незначителен, но существенно зависит от интенсивности теплоотвода от наружной стенки трубы и увеличивается с увеличением теплоотвода. Увеличение градиента температуры приводит к увеличению напряжений в стенке трубы, что также будет вызывать дополнительные пластические деформации.

1. Недосека С. А., Недосека А. Я. О трещинах, возникающих на внутренней поверхности трубопроводов, работающих при высокой температуре. Сообщение 1. Тепловые нагрузки на стенки труб при пуске и эксплуатации // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2015. – № 3. – С. 11–14.
2. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / Под ред. Б.Е. Патона. – Киев: Индпром, 2008. – 815 с.
3. Деч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и Z-преобразования. – М.: Наука, 1971. – 288 с.
4. Грантер К. Дж. Интегральные преобразования в математической физике. – М.: Гостехиздат, 1956. – 204 с.
5. ТУ14-3-460. Длительная прочность сталей при рабочих температурах. Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов. – Введ. 2009.

Поступила в редакцию
13.03.2015



РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАВИСИМОСТИ РАЗВИТИЯ ТРЕЩИН В ТОНКОЛИСТОВЫХ (ОБШИВОЧНЫХ) МАТЕРИАЛАХ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ОТ РАЗМЕРОВ ОБРАЗЦОВ

В.П. НАУМЕНКО, Н.К. КУЧЕР, Р.В. КРАВЧУК, Е.Л. ДАНИЛЬЧУК, Р.П. ПРИХОДЬКО

Ин-т проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАНУ. 01014, Киев-14, ул. Тимирязевская, 2. E-mail: info@ipp.kiev.ua

Исследовано влияние размеров пластины с центральным отверстием на развитие трещин в тонколистовых материалах. Обоснован выбор оптимальной конфигурации и размеров образца, а также приемлемого диапазона скоростей нагружения для получения упорядоченных и достаточно протяженных участков скачкообразных продвижений трещины. Определены характерные состояния трещины, которая зарождается и развивается при неизменном микромеханизме образования свободных поверхностей в условиях общей текучести. Разработана методика определения угла раскрытия вершины трещины на стадии равновесного разрушения листовых металлов, а также взаимосогласованного определения деформационной и энергетической характеристик трещиностойкости в условиях общей текучести. Конкретизирована объединенная диаграмма разрушения, устанавливающая связи между параметрами непрерывного и прерывистого роста трещины. Библиогр. 17, табл. 1, рис. 14.

Ключевые слова: листовые металлы, стесненность деформаций, прерывистое разрушение, равновесный рост трещины, профиль трещины, характерные состояния трещины

Оценка трещиностойкости листовых материалов, например алюминиевого сплава Д16АТ, с помощью традиционных теоретических моделей и критериев классической механики разрушения невозможна из-за неприемлемых требований к размерам стандартных образцов. Кроме того, упомянутые методы неприменимы к определению характеристик сопротивления листовых металлов распространению сквозных трещин, имеющих относительно большую протяженность, в условиях так называемой низкой стесненности деформаций, и с учетом особенности разрушения листовых металлических материалов по моде I+III. По мере развития традиционных подходов механики разрушения предпринимались попытки создания новых критериев разрушения твердых тел, такие как скорость диссипации энергии R , неотъемлемая работа разрушения w_e , угол раскрытия вершины трещины.

Ключевым элементом любого метода инженерной оценки разрушения является наличие достаточно полного набора данных о стандартных характеристиках прочности, пластичности и трещиностойкости материала рассматриваемой конструкции. В этот набор данных должны быть включены только те характеристики материала, которые были определены с помощью наиболее совершенных методов испытаний. Применительно к оценке трещиностойкости листовых металлов таковыми являются методы ASTM E2472–06 [1] и ISO 22889:2007 [2], базирующиеся на ис-

пользовании критического угла ψ_c раскрытия вершины трещины СТОА– ψ . Однако при изучении и использовании упомянутых стандартов было установлено, что их отдельные положения являются неоднозначными, спорными и в некоторых случаях даже ошибочными. Изложенное позволяет утверждать, что разработка нового подхода к определению характеристик трещиностойкости листовых металлов является актуальной задачей механики упругопластического разрушения.

При экспериментальных исследованиях разрушения листовых металлов уже многие десятилетия широко используется образец М(Т) с проблемной областью ABCD (рис. 1, а), удовлетворяющей размерному требованию ($2H_0 \geq 3W_0$). Стереотип приоритетности испытаний образца М(Т) свойственен практически всем национальным и международным стандартам, предназначенным для определения характеристики K_c листовых металлов. Более того, разработчики новейших нормативных документов [1, 2] считают конфигурацию образца М(Т) предпочтительной, т.е. одной из наиболее подходящих для определения критической величины ψ_c угла СТОА– ψ раскрытия вершины растущей трещины. На наш взгляд, более подходящим образцом является прямоугольная пластина, в центре которой содержится малое несовершенство. Представление о малых структурных, физических и геометрических несовершенствах обычно используют в исследованиях, посвященных построению так называемых



мых предельных диаграмм формоизменения листовых металлов. Как показано в работах [3–11], для таких целей наиболее подходящим является геометрическое несовершенство в виде сквозного кругового отверстия (рис. 1, б, в). Конфигурация образца MR(T) позволяет: 1) реализовать процесс упорядоченной прерывистости роста трещины; 2) свести к пренебрежимо низкому уровню эффекты потери устойчивости и скорости роста трещины в исследованиях разрушения листовых металлов; 3) изменять уровень стесненности деформаций путем изменения соотношения размеров $2H_0$ и $2W_0$; 4) обеспечить неизменность микромеханизмов разрушения с момента зарождения естественной трещины и до разделения образца на части; 5) однозначно идентифицировать момент зарождения трещины простым и универсальным способом.

В рамках программы экспериментальных исследований были испытаны серии образцов в широком диапазоне размеров, указанных в таблице.

Методика цифровой фото- и видеосъемки профиля трещины. Для регистрации длины трещины $2c$ в процессе нагружения были разработаны и использованы следующие методы и средства:

– цифровая фотосъемка поверхности образца цифровой фотокамерой Canon Power Shot G7 с разрешением 3648×2736 pix;

– цифровая видеосъемка поверхности образца цифровой фотокамерой Canon Power Shot G7 с разрешением 1024×768 pix, частота съемки ≈ 15 кадров/с;

– цифровая микровидеосъемка окрестности вершины трещины с использованием микроскопа KONUS Crystal Pro 5424, оснащенного цифровой CMOS-видеокамерой Levenhuk C800 NG, обеспечивающей фото- и видеосъемку с разрешением 3264×2448 pix, частота съемки $\approx 1,9$ кадров/с.

При использовании фото- и видеотехники возникали определенные трудности при подключении их к испытательным установкам [12, 13]. В частности, при фотографировании окрестности вершины движущейся трещины необходимо обеспечить взаимную привязку (синхронизацию) между номерами фотоснимков и записями параметров нагружения образца в файле эксперимента. Для этого необходимо на основе какого-либо внешнего физического процесса создать цифровой или аналоговый сигнал, связанный с процедурой фотографирования и доступный для реги-

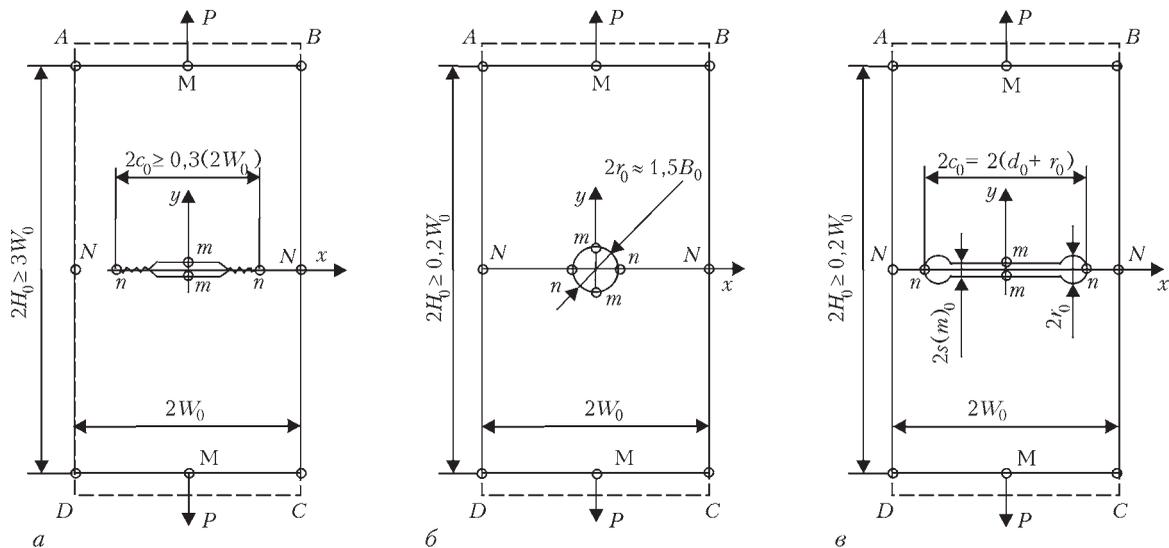


Рис. 1. Образцы из тонколистовых металлических материалов: а–в – соответственно образцы M(T), MR(T), MDR(T)

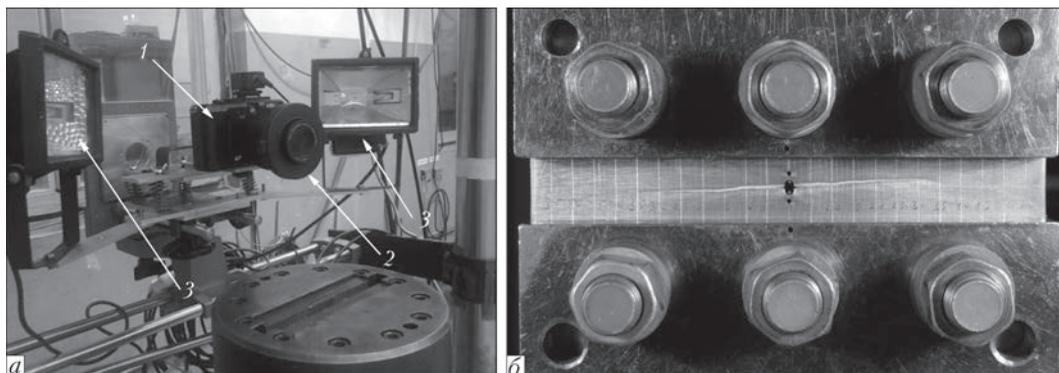


Рис. 2. Оборудование для цифровой фото- или видеосъемки (а) (1 – цифровая фотокамера Canon Power Shot G7; 2 – макрообъектив Raynox CM-3500 с адаптером Canon LA-DC58H; 3 – трехгалогеновые светильники) и фотоснимок образца шириной $2W_0 = 120$ мм и высотой $2H_0 = 12$ мм с трещиной $2c_i = 68$ мм, полученный с помощью фотокамеры Canon Power Shot G7 (б)



Размеры проблемной области образцов из сплава Д16АТ

Обозначения образцов*	$2W_0$, мм	$2H_0$, мм	$2r_0$, мм	$2d_0$, мм	$2s(m)_0$, мм	$2c_0$, мм
Крупногабаритные образцы						
MR(T)-0.5-10.0	1200	600	2	0	2	2
MDR(T)-0.5-10.0	1200	600	2	10	0.12	12
MDR(T)-0.5-10.0	1200	600	2	20	0.12	22
MDR(T)-0.5-10.0	1200	600	2	38	0.12	40
MDR(T)-0.5-10.0	1200	600	2	58	0.12	60
Образцы стандартной ширины ($2W^* = 120$ мм)						
MR(T)-5.0-1.0	120	600	2	0	2	2
MR(T)-1.5-1.0	120	180	2	0	2	2
MR(T)-1.0-1.0	120	120	2	0	2	2
MDR(T)-1.0-1.0	120	120	2	3	0,12	5
MDR(T)-1.0-1.0	120	120	2	8	0,12	10
MDR(T)-1.0-1.0	120	120	2	18	0,12	20
MDR(T)-1.0-1.0	120	120	2	38	0,12	40
MR(T)-0.5-1.0	120	60	2	0	2	2
MR(T)-0.1-1.0	120	12	2	0	2	2
Малогобаритные образцы						
MR(T)-7.3-0.1	12	87	2	0	2	2
MR(T)-1.0-0.1	12	12	2	0	2	2
MR(T)-0.5-0.1	12	6	2	0	2	2
MR(T)-0.17-0.1	12	2	2	0	2	2

В обозначении образцов первая цифра определяет форму его проблемной области (H_0/W_0), вторая – показатель размера образца (W_0/W^), где W^* – ширина стандартного образца. Для листового проката сплава Д16АТ толщиной $B_0 = 1,4 \dots 1,5$ мм принято $2W^* = 120$ мм

страции и последующей оцифровки средствами контроллера испытательной машины. В качестве такого физического процесса можно использовать командный сигнал включения фотовспышки, подаваемый с фотокамеры на адаптер центрального синхроконтakta при нажатии кнопки управления затвором (кнопка «пуск»). Также при отсутствии аппаратной связи видеокамеры с испытательной машиной возникают трудности установления значений параметров нагружения образца в моменты фиксации видеокладов профиля трещины. Для решения задачи взаимного согласования процессов нагружения и видеосъемки использовался в качестве связующего элемента момент исчезновения светового пятна от лазерной указки, управляемой цифровым выходом Digital Output контроллера.

Материалы экспериментальных исследований. Прерывистое разрушение. В испытаниях образцов из листовых материалов часто наблюдается скачкообразный рост сквозных трещин. Исходя из численности конкурирующих моделей прерывистого разрушения, на данный момент отсутствует приемлемая теория для описания упомянутого физического явления. Поэтому в рамках работы были проведены систематические экспериментальные исследования скачкообразного развития сквозных трещин в одном из типовых модельных материалов механики упругопластического разрушения.

Скачкообразный рост и характерные состояния трещины. Упругопластическое разрушение тела с трещиной в общем случае можно предста-

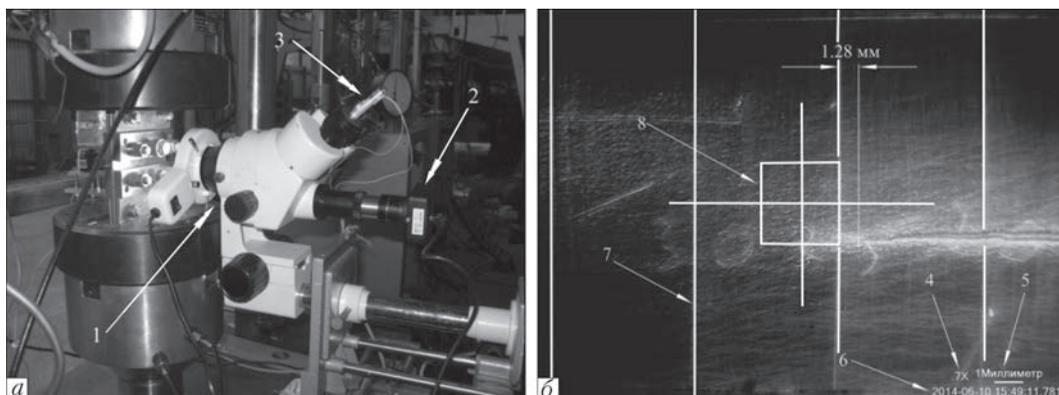


Рис. 3. Оборудование для цифровой микровидеосъемки (а) (1 – микроскоп KONUS Crystal Pro 5424; 2 – камера Levenhuk C800 NG (2); 3 – устройство LaserMarker); видеоклад (б) и фрагмент видеоклада (внизу справа) окрестности вершины трещины; (4 – увеличение микроскопа; 5 – калибровочная линейка, б – показания текущего времени; 7 – маркерная линия на поверхности образца; 8 – центральный маркер)

вить как явление чередования двух взаимосвязанных процессов, а именно, прерывистого удлинения трещины и прерывистого расширения ее полости. Отказ от повсеместного использования гипотезы о непрерывности процесса разрушения обусловлен стремлением разработать инженерную методику согласованного определения локальных параметров концевой области трещины, относящихся к процессу разрушения, и глобальных параметров, характеризующих процесс пластического деформирования материала испытываемого образца. Прежде всего необходимо было выбрать такую конфигурацию и размеры образца с начальным концентратором напряжений, которые бы позволили получить экспериментальные диаграммы с достаточно протяженным участком скачкообразного роста трещины.

Для решения этой задачи были проведены сравнительные исследования разрушения образцов (см. рис. 1), имеющих одинаковую ширину $2W_0$ и разные геометрические параметры начального выреза. Оказалось, что перспективной аль-

тернативной образцу М(Т) является образец MR(Т) с эталонным уровнем стесненности деформаций. Конфигурация этого образца позволяет: 1) реализовать процесс упорядоченной прерывистости роста трещины; 2) свести к пренебрежимо низкому уровню эффекты потери устойчивости и скорости роста трещины в исследованиях разрушения листовых металлов; 3) изменять уровень стесненности деформаций путем изменения соотношения размеров $2H_0$ и $2W_0$; 4) обеспечить неизменность микромеханизмов разрушения с момента зарождения естественной трещины и до разделения образца на части; 5) однозначно идентифицировать момент зарождения трещины простым и универсальным способом.

На диаграмме испытаний стандартного образца MR(Т) точка s_0 соответствует моменту образования полностью развитых наклонных полос пластичности, который совпадает с моментом старта трещины (рис. 4, а). Представляет интерес факт наличия и подобия скачков на восходящих и нисходящих ветвях диаграмм деформирования рас-

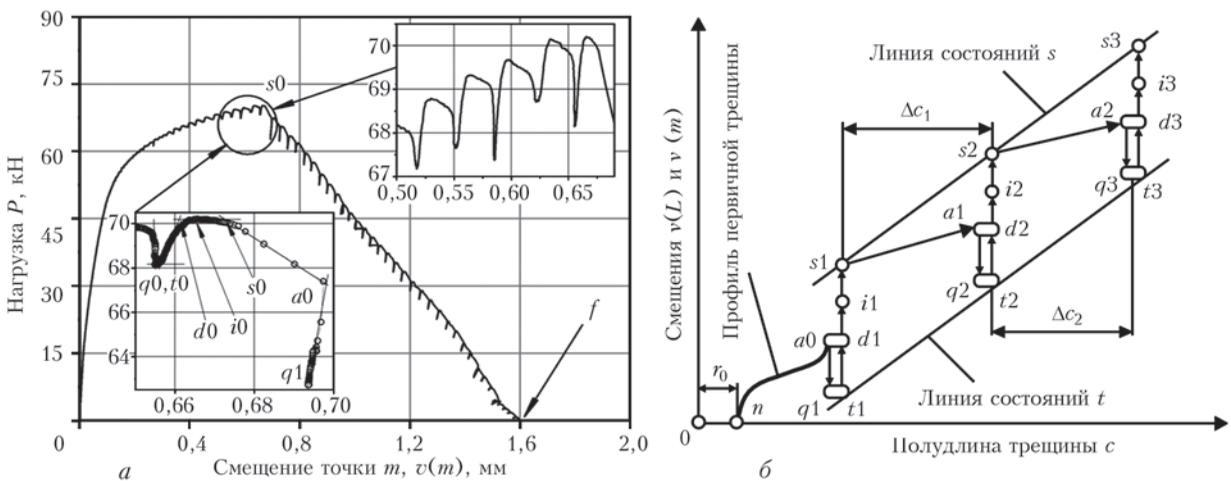


Рис. 4. Диаграмма испытаний стандартного образца MR(Т) с размерами $2W_0 = 120$ мм, $2H_0 = 12$ мм и $2r_0 = 2$ мм (а) и идеализированная траектория скачкообразных изменений координат вершины начальной трещины при фиксированном положении крайней точки n на ее профилях: схематически показаны первые три цикла самопроизвольной остановки трещины (точки a), закрытия ее берегов (a - q), постоянства геометрии трещины (q - t), раскрытия (t - s) и роста (s - a) трещины (б)

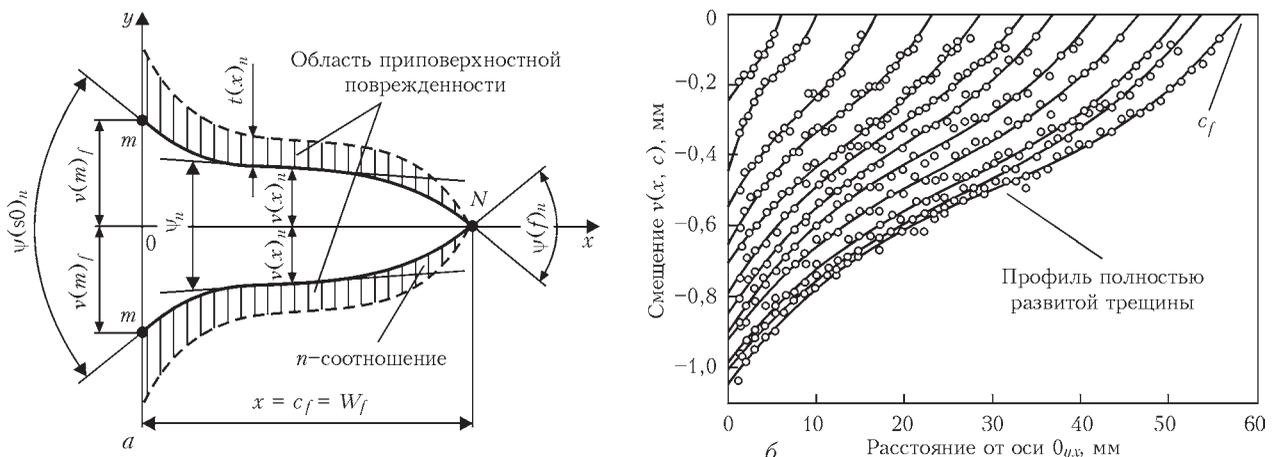


Рис. 5. Правая половина профиля полностью развитой трещины (а) и экспериментально установленные очертания трещины, растущей в образце MR(Т) шириной $2W_0 = 120$ мм, высотой $2H_0 = 120$ мм и $2r_0 = 2$ мм (б)



смагиваемого образца. По мере увеличения смещений $\Delta v(m)$, $\Delta v(M)$, $\Delta v(L)$ самопроизвольные падения нагрузки ΔP становятся сопоставимыми с таковыми на стадии прерывистого разрушения. Можно сделать вывод, что в условиях общей текучести макроскопические поля напряжений и деформаций определяют процесс накопления повреждений как на стадии зарождения трещины, так и в процессе ее роста.

Упорядоченные участки нарастания и падения нагрузки на нисходящей ветви диаграммы отражают циклические изменения геометрии полости отверстия и двух трещин, выходящих на его контур. Каждый цикл состоит из шести стадий (рис. 4): ($q-t$) – временной интервал неизменности очертаний указанной полости; ($t-d$) – увеличение поперечных размеров полости вследствие накопления локализованных пластических деформаций; ($d-i$) – скачкообразное продвижение полос пластичности внутри зон локализованных деформаций; ($i-s$) – формирование предельно ослабленных поверхностей, т.е. полностью развитых зон процесса разрушения; ($s-a$) – снятие сил когезионного сцепления между поверхностями зон процесса разрушения, отождествляемое с образова-

нием трещин; ($a-q$) – закрытие полости отверстия и трещин вследствие самопроизвольной разгрузки образца.

Ссылочный профиль центральной трещины. Таким предложено считать правую (нижнюю) ветвь профиля полностью развитой трещины (рис. 5, а). В ее очертаниях как бы запечатлены все сведения о процессах, происходящих внутри концевой области растущей трещины. Мы полагаем, что между остаточными деформациями в приповерхностных слоях материала (рис. 5, а), охватывающих тот или иной участок траектории роста сквозной трещины в листовом металле, и параметрами ее профиля на этом участке должны существовать устойчивые корреляционные связи.

Протяженность приростов трещины контролируется остаточными пластическими деформациями в областях приповерхностной поврежденности (рис. 5, а). Точки f (рис. 4) обозначают момент пересечения кончиками растущей трещины вертикальных границ образца в точках N (см. рис. 1). Кривую $v(n)$ будем называть ссылкой профилем трещины или n -соотношением (рис. 5, б). Если депланационные смещения $w(x, y)$, направленные перпендикулярно к срединной плоско-

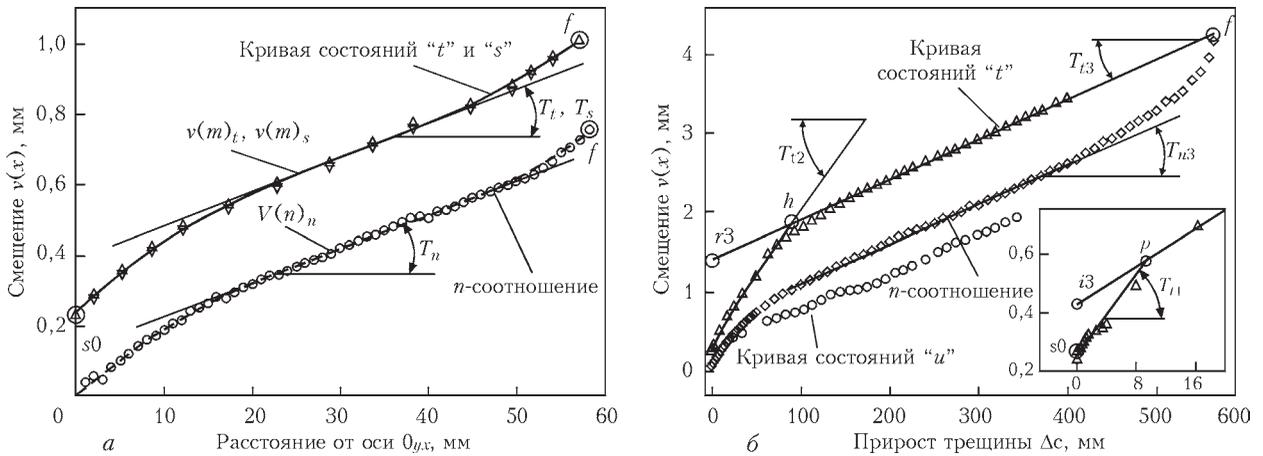


Рис. 6. Кривые непрерывного (виртуального) роста трещины в образце MR(T) размером $2W_0 = 120$ мм, $2H_0 = 12$ мм и $2r_0 = 2$ мм (а) и в образце MDR(T) размером $2W_0 = 1200$ мм, $2H_0 = 600$ мм, $2d_0 = 58$ мм и $2r_0 = 2$ мм (б)

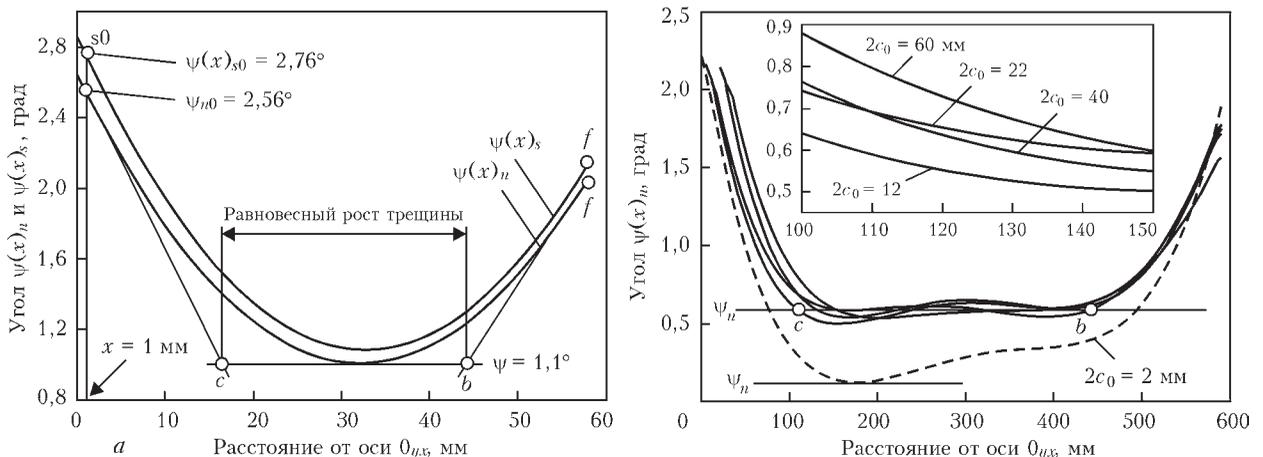


Рис. 7. Полиномиальная аппроксимация n -соотношений для образца MR(T) с проблемной областью размером $2W_0 = 120$ мм, $2H_0 = 12$ мм и $2r_0 = 2$ мм (а) и для образца MDR(T) с размерами $2W_0 = 1200$ мм, $2H_0 = 600$ мм, $2r_0 = 2$ мм (б)



сти тонкой пластины (x_0y на рис. 1), пренебрежимо малы, то геометрию полости трещины можно определить достаточно просто и точно по ее профилю на лицевых поверхностях образца. Для построения профиля трещины мы используем расстояния $2v(x)$ между ответными точками на берегах реальной трещины. Расстояния $2v(x)$ для левой и правой ветвей трещины измеряли отдельно микроскопом на одной или на обеих поверхностях пластины. Усредняя результаты измерений, мы преобразуем профиль реальной трещины в эквивалентный профиль идеализированной трещины.

Идеализированный профиль полностью развитой трещины (рис. 5, а) состоит из четырех геометрически подобных кривых $v(x)$, расположенных симметрично относительно осей $0x$ и $0y$. Он эквивалентен реальному профилю в смысле равенства максимальных размеров $2c_f$ и $2v(m)_f$ полости трещины. Каждому из шести периодически повторяющихся событий скачкообразного роста трещины (рис. 4) соответствуют свои очертания $v(x)$ ее профиля. Линии, соединяющие точки одинаковых событий (линии s и t на рис. 4, б), обозначают виртуальный (непрерывный) рост трещины.

Равновесный рост трещины. Предполагаемая трактовка понятия равновесный рост трещины на основе анализа очертаний ссылочного профиля трещины, качественно отличается от наиболее распространенной точки зрения [14]. Типичные профили полностью развитых трещин, сформировавшихся при разных уровнях глобальной стесненности деформаций, показаны на рис. 6. Под термином равновесное разрушение будем понимать непрерывный (виртуальный) процесс образования свободных поверхностей, в ходе которого угол раскрытия берегов полностью развитой трещины не изменяется (углы $\psi_n = 2T_n$ и $2T_{n3}$ на рис. 6).

Полиномы, аппроксимирующие n -соотношения, т.е. зависимость смещений $v(x)_n$ от прироста трещины $\Delta c = (x - c_0)$, про дифференцированы по переменной x . В результате определены значения

угла $\psi(x)_n$ раскрытия вершин трещины в каждой точке ее траектории на изломе образцов (рис. 7). Полученную таким образом кривую $\psi(x)_n$ можно упрощенно представить тремя прямыми отрезками. Точки ($s0$, c , b и f) пересечения этих касательных к кривой $\psi(x)_n$ друг с другом и с координатными осями определяют характерные величины углов $\psi(s0)_n$, ψ_n и $\psi(f)_n$ (см. рис. 4).

Критическим событием считается момент условного начала стадии равновесного разрушения (точки c на рис. 7). На участке $c_c \leq c \leq c_b$ выполняется приближенное равенство $\psi(x)_n \approx \psi_n$. Величина ψ_n , будучи базисной характеристикой сопротивления разрушению материала данного образца, обозначена как СТОА- ψ_n по аналогии с обозначением характеристики СТОА- ψ_c [1, 2]. Важной, с практической точки зрения, является также величина угла $\psi(s0)_n$, характеризующая сопротивление материала иницированию разрушения. Сведения о различиях между углами ψ_n и $\psi(f)_n$, т.е. о влиянии близости концевой области трещины к границам образца $MR(T)$, могут быть полезными при оценке эффектов взаимодействия растущей трещины с поверхностями иных концентраторов напряжений.

Деформационная и энергетическая характеристики трещиностойкости. После самопроизвольной остановки трещины и закрытия ее берегов (стадия $a-q$ на рис. 4) в рабочем сечении образца возникает специфическое поле напряжений. Последнему, как видно из данных на рис. 8, а, в диапазоне относительно коротких трещин ($c \leq W_0$), соответствует условию неизменности профиля трещины (стадия $q-t$), а следовательно, и неизменности уровня поврежденности материала внутри концевой области трещины. Это условие можно записать в виде равенства $\sigma_N = \sigma_{Np}^*$, где σ_N – усредненное напряжение в рабочем сечении образца; σ_{Np}^* – максимальное напряжение σ_{Np} , при котором рост изолированной (не взаимодействующей со свободными граница-

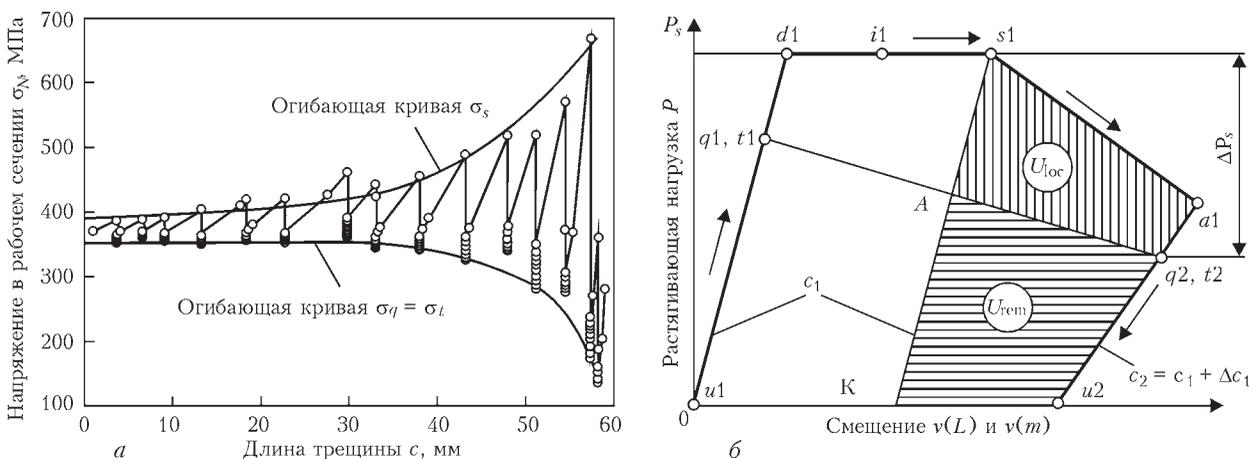


Рис. 8. Зависимость напряжений σ_N от длины трещины c в стандартном образце $MR(T)$ (а) и схема одного цикла скачкообразного изменения нагрузки P , смещений $v(L)$, $v(m)$ и длины трещины c после условной разгрузки образца (состояния t и u) (б)



ми образца) трещины в испытуемом образце невозможен. Для образца MR(T) из сплава Д16АТ, разрушающегося при эталонном уровне стесненности деформаций, характеристика $\sigma_{Nt}^* = 350$ МПа (рис 8, а).

Для определения деформационной и энергетической характеристик трещиностойкости материала по данным испытаний образца MR(T) необходимо рассмотреть каждый цикл скачкообразных изменений нагрузки и смещений отдельно (рис. 8, б и 9). Деформационная характеристика, т.е. угол раскрытия вершины трещины $\text{СТОА} - \psi(x)_{tot} = \psi(x)_n + \psi(x)_s$, определяется по диаграмме $P - v(m)$, а энергетическая характеристика $D_{tot} = D_{rem} + D_{loc}$ – по диаграмме $P - v(L)$. Первые составляющие угла $\psi(x)_{tot}$ и скорости диссипации энергии D_{tot} ($\psi(x)_n$ и D_{rem}) характеризует непрерывное (виртуальное) разрушение, а вторые составляющие ($\psi(x)_s$ и D_{loc}) – прерывистое (реальное) разрушение.

Зависимость угла раскрытия трещины от координаты x $\psi(x)_s$ рассчитывается по формуле:

$$\psi(x)_{sj} = 2 \arctg \left(\frac{\delta(x)_{sj}}{2\Delta c_{j+1}} \right). \quad (1)$$

Здесь

$$\delta(x)_{sj} = 2 \left[v(m)_{sj} - v(m)_{u0} \right] \left(\frac{\Delta c_{j+1}}{c_{sj} + \Delta c_{j+1}} \right),$$

где $v(m)_s$ – смещение точки m в момент s ; $v(m)_{u0}$ – смещение точки m , определяемое по точке пересечения линии полной (условной) разгрузки образца в точке (q_0, t_0) на диаграмме $P - 2v(m)$, которая параллельна линии упругого деформирования образца на этой диаграмме (см. рис. 4, а); c_s – полудлина трещины перед ее продвижением; Δc – протяженность прироста трещины, $j = 1, 2, 3, \dots$. Предполагается, что протяженность полностью развитой зоны процесса разрушения всегда равна протяженности соответствующего прироста трещины Δc . При выводе формулы (1) не использовалось распространенное предположение о том, что в условиях общей текучести прироста смещений точек приложения нагрузки равны приростам раскрытия вершины трещины [15].

Глобальную D_{rem} и локальную D_{loc} составляющие энергетической характеристики D_{tot} рассчитывали соответственно по формулам

$$D_{rem} = \frac{U_{rem}}{2B_0\Delta c}, \quad D_{loc} = \frac{U_{loc}}{2B_0\Delta c}, \quad (2)$$

где U_{rem} и U_{loc} – площади на диаграмме $P - v(L)$, расположенные соответственно под и над линией $t1-t2$ (рис. 8, б). В отличие от общепринятой трактовки понятия скорость диссипации энергии D , в данном случае речь идет об усредненной величине D_{tot} , относящейся к конечному приросту трещины Δc .

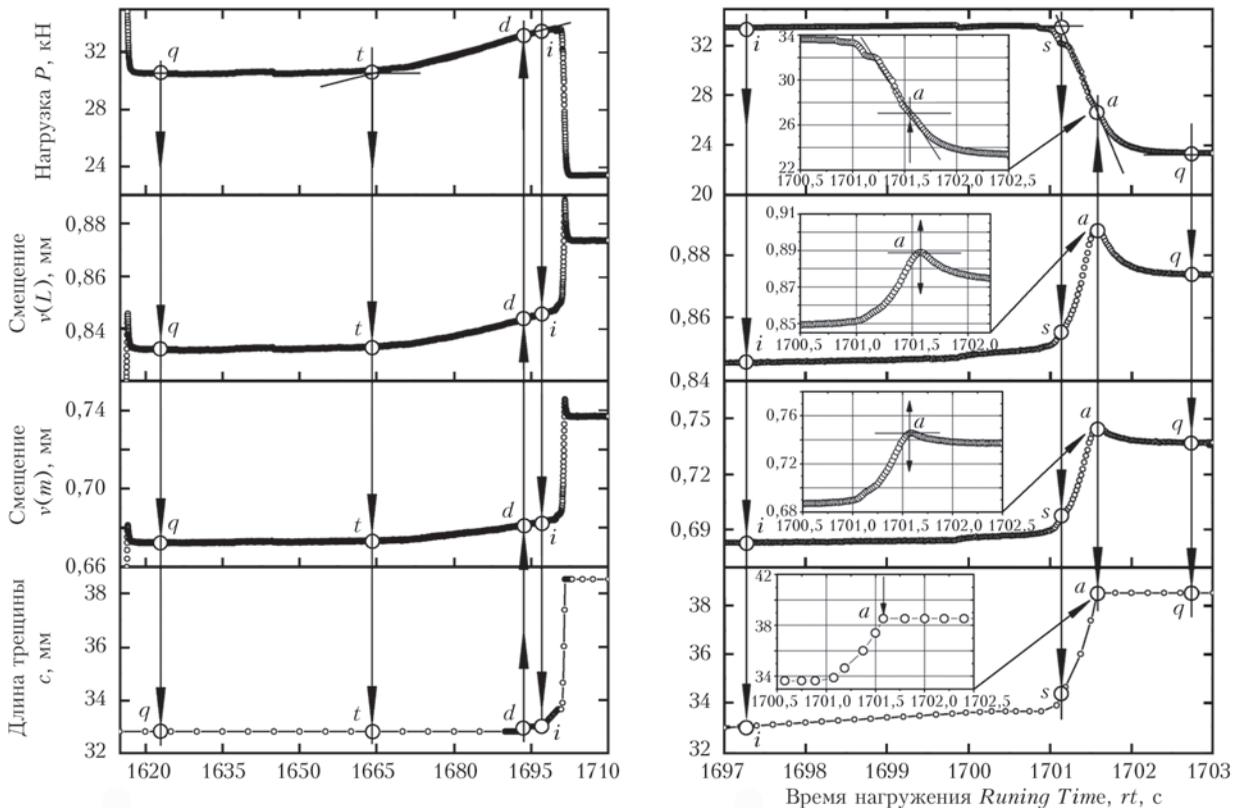


Рис. 9. Временная развертка одного из циклов скачкообразного роста трещины в образце MR(T) с размерами проблемной области $2W_0 = 120$ мм и $2H_0 = 12$ мм с отверстием диаметром $2r_0 = 2$ мм в центре

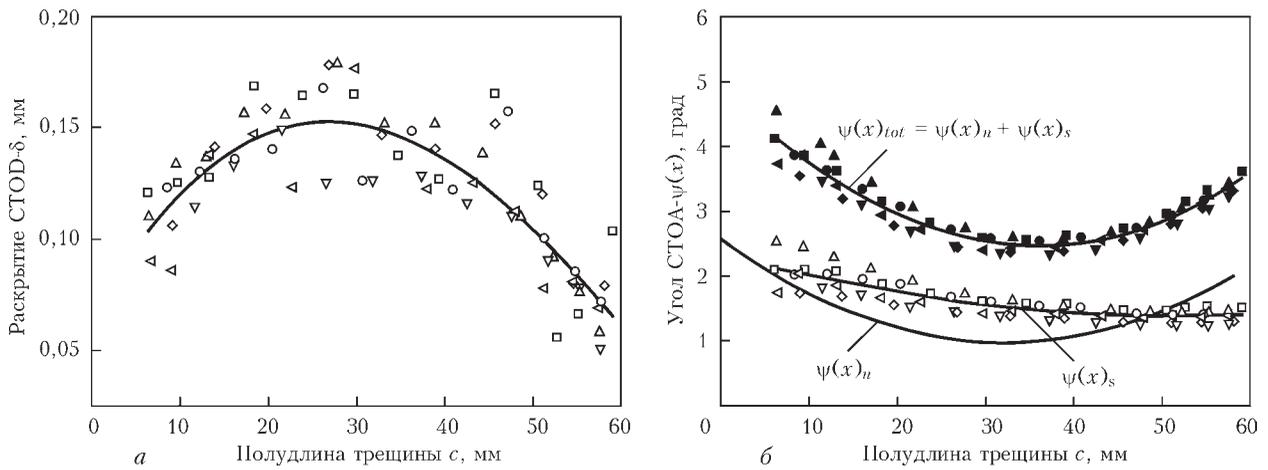


Рис. 10. Изменения величины раскрытия (а) и угла раскрытия (б) вершины трещины, продвигающейся скачкообразно в шести идентичных образцах MR(T) с проблемной областью, имеющей размеры $2W_0 = 120$ мм, $2H_0 = 12$ мм и $2r_0 = 2$ мм

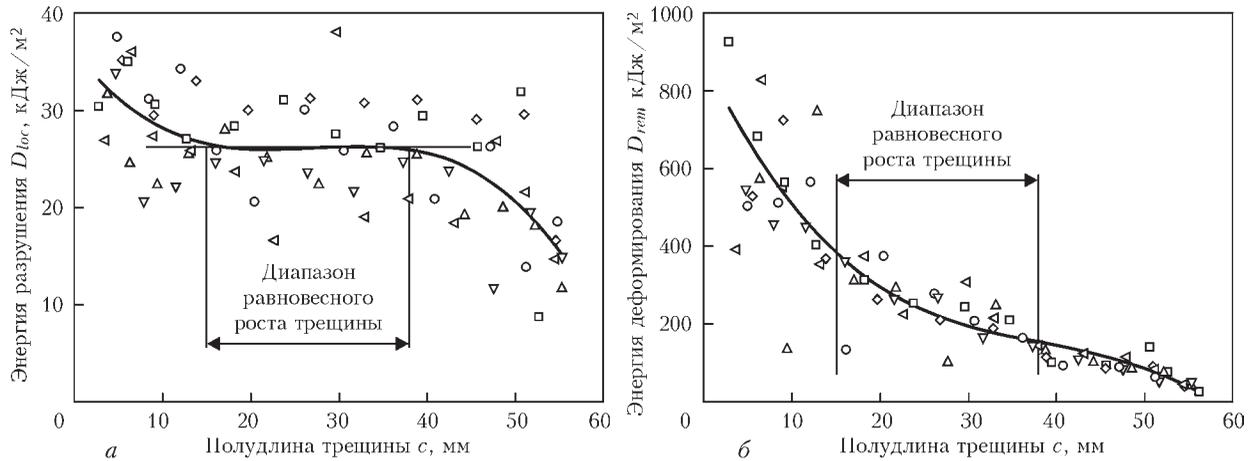


Рис. 11. Изменение усредненных (по площади прироста трещины) значений скорости диссипации энергии на стадии скачкообразного роста трещины в шести идентичных образцах MR(T) с проблемной областью размером $2W_0 = 120$ мм, $2H_0 = 12$ мм и $2r_0 = 2$ мм (а) и на стадии пластического деформирования материала вне концевой области трещины (б)

Результаты определения деформационных, раскрытия вершины трещины СТОД– δ (рис. 10, а) и угла раскрытия вершины трещины СТОА– ψ (рис. 10, б), а также энергетической (рис. 11) характеристик трещиностойкости сплава Д16АТ удовлетворительно согласуются с данными, полученными с использованием стандарта [1], а также с приведенными в литературных источ-

никах для аналогичных алюминиевых сплавов. В частности, суммарный угол $\psi(x)_{tot}$ раскрытия вершины трещины (рис. 10, б) в диапазоне $10\text{ мм} \leq c_s < 60$ мм располагается в поле разброса критической величины угла $\psi_c = (3,0 \pm 0,9)$ град, которая была установлена нами в работе [9] по данным испытаний сплава Д16АТ.

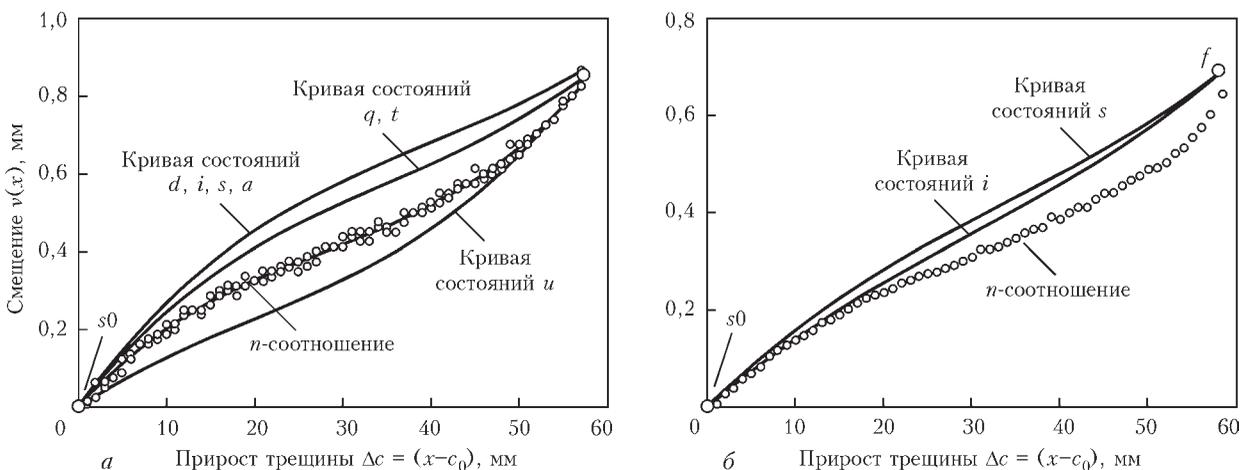


Рис. 12. Объединенная диаграмма разрушения трех образцов MR(T) с проблемной областью размером $2W_0 = 120$ мм, $2H_0 = 120$ мм и $2r_0 = 2$ мм (а) и одного образца MR(T) размером $2W_0 = 120$ мм, $2H_0 = 12$ мм и $2r_0 = 2$ мм (б)

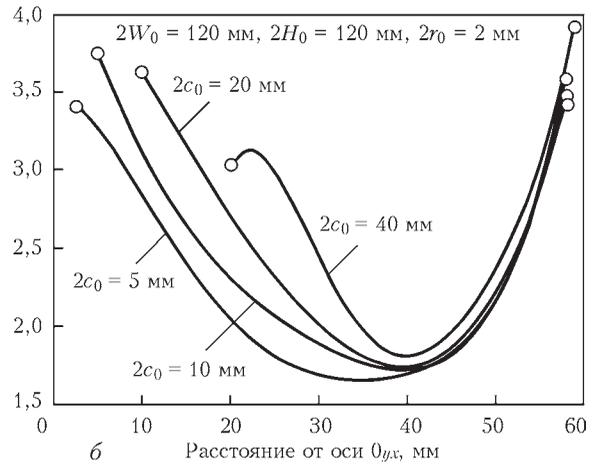
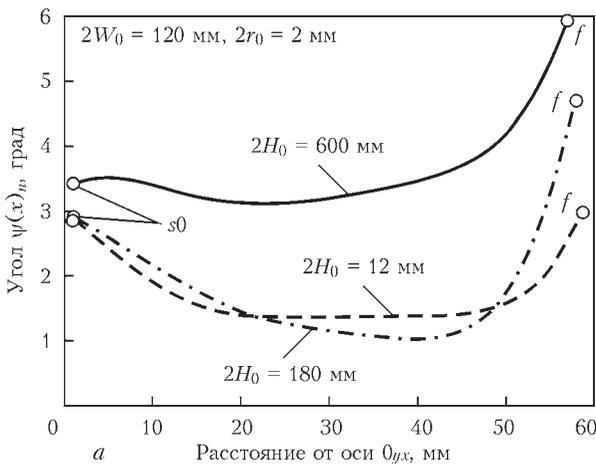


Рис. 13. Значение угла $\psi(x)_n$ для образцов MR(T) шириной $2W_0 = 120$ мм разной высоты (а) и для образцов MDR(T) шириной $2W_0 = 120$ мм, высотой $2H_0 = 120$ мм, имеющих разную начальную длину концентратора $2c_0$ (б)

Из трех энергетических характеристик трещиностойкости сплава Д16АТ D_{loc} , D_{rem} и D_{tot} только первая частично удовлетворяет требованию независимости от прироста трещины в диапазоне равновесного разрушения (рис. 11, а). Среднее значение $D_{loc} = 26,2$ кДж/м² хорошо согласуется с величиной $R_0 = 25$ кДж/м², характеризующей рост трещины в алюминиевом сплаве 2024–Т351 при постоянном уровне так называемой локальной вязкости разрушения (crack tip toughness) [16].

Объединенная диаграмма разрушения. В общем случае диаграмма представлена восемью зависимостями смещения $v(x)$ от виртуального прироста трещины Δc . Для ее построения необходимо иметь два набора данных о разрушении образца MR(T). Первый набор – это данные, полученные при испытаниях, в которых трещина распространялась скачкообразно вследствие самопроизвольных разгрузок образца (см. рис. 4, а), второй – при испытаниях аналогичного образца с периодически повторяющимися принудительными разгрузками. При этом главной является задача определения параметров профиля трещины $v(x, c)_u$ в полностью разгруженном образце (рис. 4 [17]).

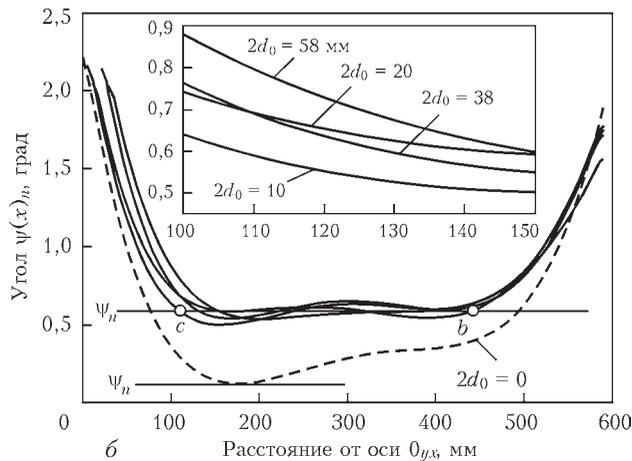


Рис. 14. Значение угла $\psi(x)_n$ для образцов MR(T) и MDR(T) с разной начальной длиной концентратора $2c_0$, имеющих одинаковые размеры $2H_0 = 1200$ мм, $2W_0 = 600$ мм, $2r_0 = 2$ мм

На рис. 12, а показана объединенная диаграмма разрушения для трех одинаковых пластин, в испытаниях которых рост трещины преднамеренно прерывался полными разгрузками. Поэтому она представлена только четырьмя кривыми $v(x)$. Здесь характерные состояния трещины d , i , s и a , относящиеся к стадии прерывистого разрушения, обозначены одной предельной кривой. Для сравнения на рис. 12, б представлена диаграмма, полученная для случая скачкообразного роста трещины. С помощью этих диаграмм могут быть определены линейные $v(x)$ и угловые $\psi(x)$ смещения берегов трещины с момента ее возникновения и до разделения пластины на части.

Влияние геометрии образца на угол $\psi(x)_n$. Для изучения влияния размеров образца на значение угла $\psi(x)_n$ проводились испытания образцов шириной $2W_0 = 120$ мм, $2W_0 = 1200$ мм разной конфигурации. На рис. 13 представлены результаты испытаний образцов шириной $2W_0 = 120$ мм разной высоты $2H_0$ и образцов с размерами $2W_0 = 120$ мм, $2H_0 = 120$ мм с разной начальной длиной концентратора $2c_0$. На рис. 14 представлено значение угла раскрытия для образцов MR(T) и MDR(T) шириной $2W_0 = 1200$ мм с разной начальной длиной концентратора $2c_0$.

Выводы

Разработана методика получения, обработки и интерпретации первичных данных прерывистого разрушения прямоугольной пластины с центральным отверстием при одноосном растяжении. Исследовано влияние размеров образца на развитие трещин в тонколистовых (обшивочных) материалах авиационных конструкций. Обоснован выбор оптимальной конфигурации и размеров образца, а также приемлемого диапазона скоростей нагружения, что обеспечивает получение упорядоченных и, вместе с тем, достаточно протяженных участков скачкообразных продвижений трещины в испытываемом образце, позволяющие осуществлять



многоуровневую оценку разрушения образцов из листовых металлов. Определены характерные состояния трещины, которая зарождается и продвигается при неизменном микромеханизме образования свободных поверхностей в условиях общей текучести.

Разработана методика определения угла раскрытия вершины трещины на стадии равновесного разрушения листовых металлов, а также взаимосогласованного определения деформационной и энергетической характеристик трещиностойкости в условиях общей текучести. Определена объединенная диаграмма разрушения, устанавливающая связи между параметрами непрерывного и прерывистого роста трещины.

1. E2472-06. Standard Test Method for Determination of Resistance to Stable Crack Extension under Low-Constraint Conditions. – ASTM Standard, 2007.
2. ISO 2288. Metallic Materials – Method of Test for the Determination of Resistance to Stable Crack Extension Using Specimens of Low Constraint. – Int. Standard, 2007.
3. Naumenko V.P. Incorporation of length scales in plane stress fracture analysis // Proc. of the ECF16 Fract. of Nano and Eng. Materials and Structures. – E.E. Gdoutos (Ed.), Alexandropoulos, Greece. – 2006.
4. Naumenko V.P., Skrypnuk Yu.D. Sensitivity of crack nucleation parameters to the geometric imperfection // Proc. ECF16 Fracture of Nano and Engineering Materials and Structures, (Ed.) E. E. Gdoutos, Alexandropoulos, Greece. – 2006.
5. Naumenko V.P., Lenzion S.V. Comprehensive Assessment of a Naturally Forming Tear Crack in Thin-Sheet Aluminium

- Alloy // Proc. ESIA8 Conf. on Through-life Management of Structures, Manchester. – 2006.
6. Naumenko V.P., Lenzion S.V., Skrypnuk Yu.D. Ductile tearing in narrow and wide strips of thin-sheet aluminium alloy // Proc. ESIA8 Through-life Management of Structures Comp. – Manchester, 2006. – 10 p.
 7. Naumenko V.P., Atkins A.G. Engineering assessment of ductile tearing in uniaxial and biaxial tension // International Journal of Fatigue. – 2006. – 28. – P. 494–503.
 8. Naumenko V.P. An engineering concept of fracture instability // Proc. ICMFF8. – Sheffield, 2007. – 8 p.
 9. Naumenko V.P., Lenzion S.V., Limansky I.V. Displacement-based assessment of ductile tearing under low-constraint conditions // The Open Mech. Eng. J. – 2008. – 2. – P. 40–59.
 10. Naumenko V.P., Limansky I.V. Energy-based assessment of ductile tearing in a thin sheet aluminium alloy // Proc. Eng. – 2009. – 1, Issue 1. – P. 63–66.
 11. Naumenko V.P. Through-life assessment of ductile tearing under low-constraint conditions // Proc. of 12th Int. conf. on Fracture. – Ottawa, 2009. – 10 p.
 12. Науменко В., Лиманський І., Кравчук Р. Переривчасте руйнування та характерні стани тріщини // Вісн. Тернопіл. нац. техн. ун-ту. – 2014. – №4 (76). – С. 21–33.
 13. Лиманський І., Кравчук Р. Методика визначення параметрів навантаження зразка у моменти фіксації відеокадрів профілю тріщини // Так саме. – 2015. – №1 (77). – С. 58–63.
 14. Tvergaard V., Hutchinson J.W. The relation between crack growth resistance and fracture process parameters in elastic-plastic solids // J. Mech. Phys. Solids. – 1992. – 40. – P. 1377–1397.
 15. Sumpter J.D.G. The energy dissipation rate approach to tearing instability // Ibid. – 2004. – 71. – P. 17–37.
 16. Atkins A.G., Chen Z., Cotterrel B. Prediction of the energy dissipation rate in ductile crack propagation // Fatigue and Fract. of Eng. Mat. and Struct. – 2003. – 26. – P. 67–77.
 17. Науменко В.П., Лиманський І.В. Сопротивление разрушению листовых металлов и тонкостенных конструкций. Сообщ. 1. Критический обзор // Пробл. прочности. – 2014. – № 1. – С. 25–49.

The influence of dimensions of a plate with central hole on crack propagation in sheet materials was studied. Selection of optimum configuration and dimensions of the sample, as well as of acceptable range of loading rates was substantiated, in order to produce ordered and sufficiently extended sections of abrupt advancement of the crack. Characteristic states of the crack which initiates and propagates at unchanged micromechanism of free surface formation under the conditions of total yield were determined. A procedure was developed for determination of the angle of crack tip opening at the stage of equilibrium failure of sheet metals, as well as of crack resistance under the conditions of total yield. Combined fracture diagram, correlating the parameters of continuous and intermittent crack growth, was specified. 17 References, 1 Table, 14 Figures.

Keywords : sheet metals, deformation constraint, intermittent failure, equilibrium crack growth, crack profile, characteristic crack state

Поступила в редакцию
04.10.2015

Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин:

Збірник наукових статей. – Київ: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, 2015. – 816 с.

До збірника ввійшли статті, які підготовлені за результатами цільової комплексної програми НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин», отриманими впродовж 2013–2015 рр., до реалізації якої були залучені інститути НАН України. Мета програми – розробка методологічних основ прогнозування залишкового ресурсу конструкцій, створення методів, технічних засобів і технологій для оцінки технічного стану та подовження термінів експлуатації техногенно та екологічно небезпечних об'єктів.

Для наукових співробітників, інженерів, студентів старших курсів, зайнятих розробкою та експлуатацією конструкцій, споруд та машин.

Електронне видання: www.patonpublishinghouse.com/rus/compilations#winresurs2015





НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ОБЪЕКТОВ ПОВЫШЕННОЙ ОПАСНОСТИ

В.А. ТРОИЦКИЙ, М.Н. КАРМАНОВ, И.Я. ШЕВЧЕНКО

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

В последние годы наблюдается интенсивное развитие методов неразрушающего контроля (НК) применительно к оценке состояния промышленных объектов повышенной опасности. В данной статье дано описание передовых технологий НК, разработанных в ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ. Обсуждаются возможности и особенности практического применения этих технологий в промышленности. Библиогр. 15, рис. 9.

Ключевые слова: флэш-радиография, тангенциальное рентгеновское просвечивание, подвижное локальное намагничивание, лазерная термография, контроль герметичности

Оборудование для заводов и трубопроводы в Украине эксплуатируются уже около 40 лет и основными проблемами являются усталость и коррозия металла. Эти объекты должны периодически проверяться с использованием различных методов НК с целью продления ресурса и обеспечения безопасности эксплуатации ответственных объектов, прогноза и предупреждения аварий, техногенных катастроф [1].

Этой проблеме должно уделяться исключительное внимание. Согласно отчету исследовательской компании «Frost & Sullivan», которая занимается консалтингом в области глобального развития, рынок услуг НК в США и странах западной Европы оказался одним из немногих, показавших впечатляющие результаты во время мирового финансового кризиса [2]. Несмотря на значительные убытки в промышленности в ходе мирового финансового кризиса, объемы услуг НК в 2009 г. в этих странах ни только не упали, но и выросли на 4,7 %, и в 2010 г. они составляли уже 7 %. Ожидается, что к 2017 г. они вырастут до 9%. Это свидетельствует о том, что одним из признаков развития страны являются объемы применения объективных методов и средств оценки состояния эксплуатируемых объектов.

Этим объясняются большие объемы применения физических методов исследований машин, материалов и механизмов в США и странах ЕС, где стабильный рост объема услуг НК происходит как в условиях подъема экономики, так и в период ее спада. В этих странах в случае подъема экономики резко возрастает количество новых объектов и выпускаемого оборудования, которое должно безопасно эксплуатироваться. В условиях экономического спада возрастают услуги по НК старых объектов, которые надо поддерживать с целью недопущения аварий.

Стоимость мониторинга технического состояния объектов с использованием радиационного,

электромагнитного, акустического и др. излучений несоизмеримо меньше стоимости ликвидации последствий аварий. И одной из важнейших стоящих здесь задач является совершенствование обследования долго эксплуатируемых объектов, оценка их остаточного ресурса, разработка методик НК сварных конструкций, сооружений в различных отраслях промышленности. Обеспечение безопасности эксплуатации ответственных объектов, прогноз и предупреждение аварий, техногенных катастроф – одна из главных функций специалистов, работающих в области НК.

Основная проблема — огромные объемы контролируемых конструкций сложных инженерных сооружений [3, 4]. Многие металлоконструкции находятся в труднодоступных местах, закрыты изоляцией. Невыявленные коррозионные поражения, возникающие в процессе эксплуатации технологических объектов повышенной опасности (технологические трубопроводы, суда, танки, конструктивные элементы и т.п.) могут стать причиной утечек, пожаров, техногенных катастроф. Обычно для выявления коррозионных поражений в трубопроводах под изоляцией используют традиционные локальные методы диагностики, связанные со снятием изоляции, возможным возведением лесов, что резко повышает трудоемкость и стоимость такого контроля. Ключевые позиции здесь занимает периодический НК наиболее нагруженных элементов сооружений с использованием воздействия на них различных физических полей (электромагнитных, акустических, радиационных и др.). Выборочный контроль в этом случае не гарантирует полного выявления поврежденных участков контролируемых объектов.

Современные средства НК позволяют решить данную проблему с использованием так называемых интегральных методов контроля:

– низкочастотный ультразвуковой контроль направленными волнами [5] позволяет прово-



дить 100%-ный контроль состояния внутренней и внешней поверхности трубопроводов на больших расстояниях (20...100 м) без сканирования их поверхности, без снятия термоизоляции, в том числе в недоступных местах – под землей, под водой, под авто- и железнодорожными переходами;

– термографический контроль [6] обеспечивает 100%-ный контроль на больших визуально доступных поверхностях контролируемого объекта.

Интегральные методы отличаются высокой производительностью и используются для сплошного контроля объектов с последующим контролем выявленных потенциально опасных участков традиционными локальными методами НК с точным измерением выявленных дефектов и соответствующей оценкой качества контролируемого объекта.

Обеспечение безопасности эксплуатации ответственных объектов, прогноз и предупреждение аварий, техногенных катастроф – одна из главных задач специалистов, работающих в области охраны труда. Ключевые позиции занимает периодический НК наиболее нагруженных элементов сооружений с использованием воздействия на них различных физических полей (электромагнитных, акустических, радиационных и др.).

Одной из важнейших задач является совершенствование обследования долго эксплуатируемых объектов, оценка их остаточного ресурса, разработка методик НК сварных конструкций, сооружений в различных отраслях промышленности. В ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины разрабатываются соответствующее оборудование и оригинальные технологии на основе радиационных, акустических, магнитных и других физических полей, которое позволяет измерить размеры и расположение внутренних дефектов. Эта информация ложится в основу последующих расчетов прочности, определения остаточного ресурса и допустимости эксплуатации объекта.

Имеющийся в ИЭС им. Е.О. Патона научно-технический потенциал позволяет обеспечивать высокий уровень разрабатываемых технических регламентов, часть этих технологий была разработана при выполнении проектов 6-й и 7-й Рамочных программ ЕС.

Ниже приведены краткие описания некоторых современных технологий оценки качества эксплуатируемых объектов, соответствующих мировым стандартам, которые должны быть внедрены в Украине.

Флэш-радиография – это радиография без использования рентгеновских пленок и связанных с ними расходных материалов [7]. Технология радиационного контроля без промежуточных носителей информации (пленок, запоминающих пластин), обеспечивает получение рентгеновско-

го изображения внутренней структуры объекта в электронном виде в реальном времени, т. е. непосредственно во время просвечивания объекта. Это портативное рентгентелевидение. Процесс получил название флэш-радиографии. Для этих целей используются два вида преобразователей: твердотельные и электронно-оптические. Они могут быть разных размеров и рассчитаны на разные энергии излучения.

В отличие от пленочной радиографии результат получают на экране монитора в виде распечатки изображения на обычной писчей бумаге и на электронном носителе информации.

Портативная рентгентелевизионная технология (рис. 1) полностью заменяет пленочную радиографию. При необходимости рентгентелевизионная информация в электронном виде передается по Интернету или сохраняется. Объем записи на портативное запоминающее устройство (флэш-ку) практически не ограничен. В флэш-радиографических системах применяются высокочувствительные цифровые камеры, эффективные рентгеновские экраны. Такие мобильные рентгентелевизионные системы (массой до 15 кг) имеют размер рабочего поля 120...200 мм, обеспечивают чувствительность контроля 0,8...1 %, что лучше или соизмеримо с чувствительностью рентгеновских пленок и имеют разрешающую способность до 5 пар лин./мм. По скорости, стоимости, производительности новая технология на порядок эффективнее, чем пленочная радиография. Портативные флэш-рентгентелевизионные системы обеспечены программами для обработки и архи-

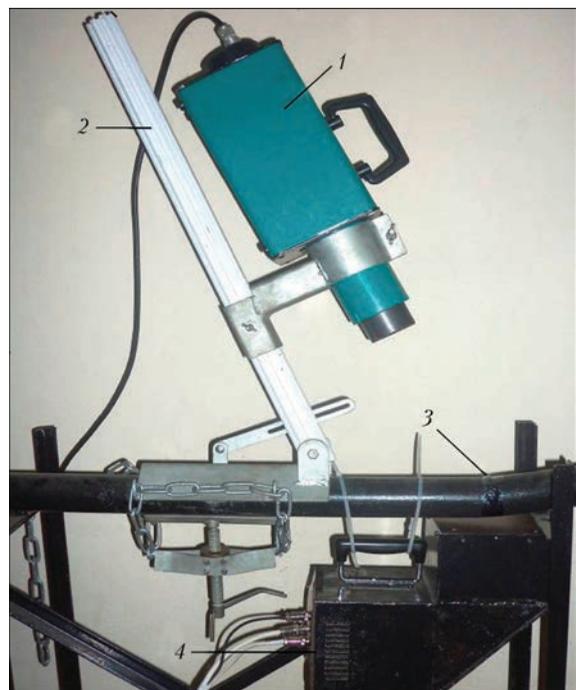


Рис. 1. Портативная цифровая рентгентелевизионная система (РТС-П): 1 – рентгеновский излучатель; 2 – штатив; 3 – контролируемое сварное соединение; 4 – детектирующее устройство

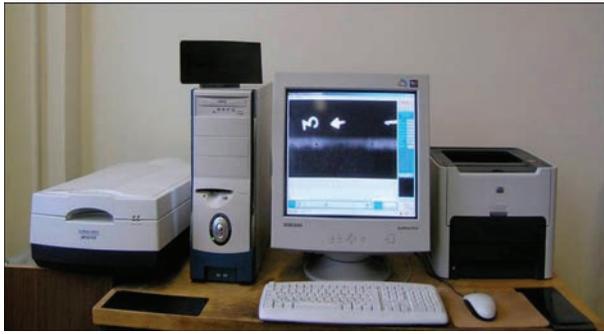


Рис. 2. Цифровая система радиографического контроля вирования изображений, а также измерения размеров дефектов. Для реализации этой технологии используются технические средства, имеющиеся у Заказчика, т.е. переход от традиционной пленочной радиографии к новой технологии не вызывает особых проблем и состоит только в замене пленки на электронный детектор, монитор и печатающее устройство. Ожидается широкое внедрение флэш-радиографии для контроля качества газо- и нефтепроводов; элементов и конструкций авиационного, железнодорожного и автомобильного транспорта; продукции химического и энергетического машиностроения; сварных и паяных соединений; сосудов высокого давления; композитных материалов и в таможенном деле. Флэш-радиография проводится оперативно в реальном времени при скорости и стоимости получения изображения на порядок быстрее, чем при пленочной радиографии.

Цифровая обработка радиационных изображений используется как при флэш-радиографии, так и для повышения качества и разрешающей способности традиционных рентгеновских снимков на пленку. При этом предлагается концепция модульного построения цифровых систем радиационного контроля, обеспечивающая возможность выбора заказчиком цифровых ресурсов, необходимых для расшифровки изображений радиационного контроля в каждом конкретном случае. В предлагаемой

модульной системе (рис. 2) могут использоваться различные типы радиационных детекторов (рентгеновская пленка, рентгентелевизионные камеры, матричные преобразователи и др.) [8].

Использование данного комплекса увеличивает качество радиационных изображений, позволяет увеличить чувствительность радиографии.

Тангенциальное рентгеновское просвещение, т.е. просвещение по касательной [9]. Это новая технология, применяется тогда, когда радиографический контроль в стандартных проекциях невозможно выполнить или он не обеспечивает получения необходимых данных. При этом тангенциальные проекции проводят с направлением центрального луча по касательной к изучаемому объекту (рис. 3).

Тангенциальное просвещение позволяет определять остаточную толщину металла труб (коррозии/эрозии на внешней или внутренней поверхности стальных труб), зазоры между обшивкой и телом, внутреннее заполнение объема и т.п. без снятия внешней изоляции. Пока эта уникальная технология внедрена при НК тонкостенных труб из аустенитных сталей атомных электростанций Украины. Для наглядности метода разработана цветовая селекция границ радиационного изображения стенок трубы и последующих наслоений, например, теплоизоляции, защитного кожуха и т.п. Точность определения толщины стенки для труб диаметром до 100 мм составляет $\pm 0,2$ мм. Эта технология успешно применяется для оценки коррозии.

Технология подвижного локального намагничивания дала толчок более широкому применению магнитопорошковой дефектоскопии, обеспечила переход от традиционных способов однонаправленного намагничивания к разнонаправленному, т.е. к активному поиску дефектов.

В ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ впервые разработаны портативные средства для локально-

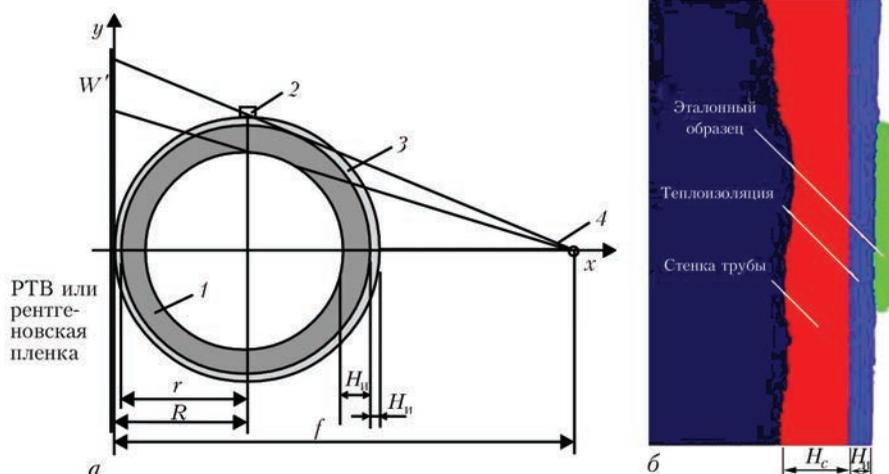


Рис. 3. Тангенциальное просвещение трубы: а – схема просвещения; б – цветовая селекция результатов контроля толщины стенки трубы (1 – труба; 2 – эталонный образец; 3 – изоляция трубы; 4 – источник излучения)



Рис. 4. Подвижные намагничивающие устройства

го разнонаправленного намагничивания, что позволяет находить трещины и зоны повышенного (усталостного) нагружения [10]. Выпущена серия таких намагничивающих устройств (МУ) под разные геометрические формы контролируемых объектов с широкими функциональными возможностями (рис. 4). Возвратно-поступательные движения этих устройств способствуют повышению выявляемости трещин. После обнаружения скоплений магнитного порошка МУ переводится в режим оценки индикации, в режим увеличения тангенциальной составляющей магнитного поля.

Магнитопорошковый контроль (МПК) объектов со сложной геометрией поверхности проводится с использованием сменных полюсных наконечников. Особенно эффективен этот контроль крупногабаритных изделий (например, тележек, ободов колес, элементов железнодорожного транспорта), контроль качества протяженных объектов больших площадей (днища резервуаров, листовые кон-

струкции), патрубков нефте-, газопроводов и др. Эту отечественную технологию высоко оценили японские и американские специалисты [11, 12].

Имеется большой практический опыт внедрения подвижных МУ и новой технологии МПК для объектов железнодорожного транспорта. Эти устройства изготавливаются под конкретные конструкции, подлежащие МПК (см. рис. 4).

Лазерная термография – это перспективная современная технология. Несмотря на то, что в настоящее время появилось много технических возможностей для термографических исследований, пока нет технологий для дистанционных измерений размеров обнаруженных площадей, зон потери тепла, глубины поражения. Для решения этой задачи нами предложено объединить термографию с лазерными дальномерами [6]. Созданные в ИЭС им. Е.О. Патона лазерно-термографические измерительные системы позволяют определять дистанционно координаты и геоме-



трические размеры потенциально опасных дефектов. В результате исследований было разработано измерительное лазерно-термографическое устройство и соответствующее ему программное обеспечение для определения координат и геометрических размеров дефектов, обнаруженных при термографии.

Данный комплекс прост в эксплуатации, может использоваться в атомной, химической и нефтехимической, нефтегазодобывающей промышленности, для объектов газотранспортной системы, электрических систем и машин, жилых зданий, домен, промышленных и гражданских сооружений (рис. 5).

Контроль низкочастотными ультразвуковыми (УЗ) волнами протяженных объектов является одним из важнейших достижений УЗ контроля, позволяющего контролировать длинномерные конструкции без сканирования их поверхности [5]. В основу этого метода положен принцип анализа отраженных низкочастотных направленных волн, способных распространяться на большие расстояния. Это позволяет обнаруживать коррозионные поражения, глубина которых не менее 10 % толщины стенки трубы на расстоянии до 100 м. При этом доступ к трубе необходим только в месте установки акустической антенны, состоящей

из набора низкочастотных УЗ преобразователей. Обследование может выполняться в процессе эксплуатации труб, заполненных газом, а также при повышенных температурах без снятия изоляции.

На рис. 6 показаны антенны на труднодоступных (подземных) технологических трубопроводах с температурой поверхности до 80 °С, диаметром до 330 мм.

Созданная в ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины аппаратура работает на частотах 16 и 36 кГц для контролируемых труб от 54 до 330 мм.

Технология оценки размеров трещиноподобных несплошностей, осуществляемая дифракционно-временным ультразвуковым методом известна за рубежом как метод TOFD [13]. Технология заключается в анализе УЗ волн дифракции, которые возникают на границах несплошности, т.е. на краях трещин. Погрешность измерения размеров трещин составляет 1...2 мм в диапазоне металла толщин 10...50 мм. Традиционные амплитудные методы УЗК оценки размеров внутренних несплошностей в сварных соединениях имеют значительно более высокие погрешности. Периодическое использование оборудования для точного измерения трещиноподобных дефектов позволяет наблюдать за развитием дефекта без прекращения

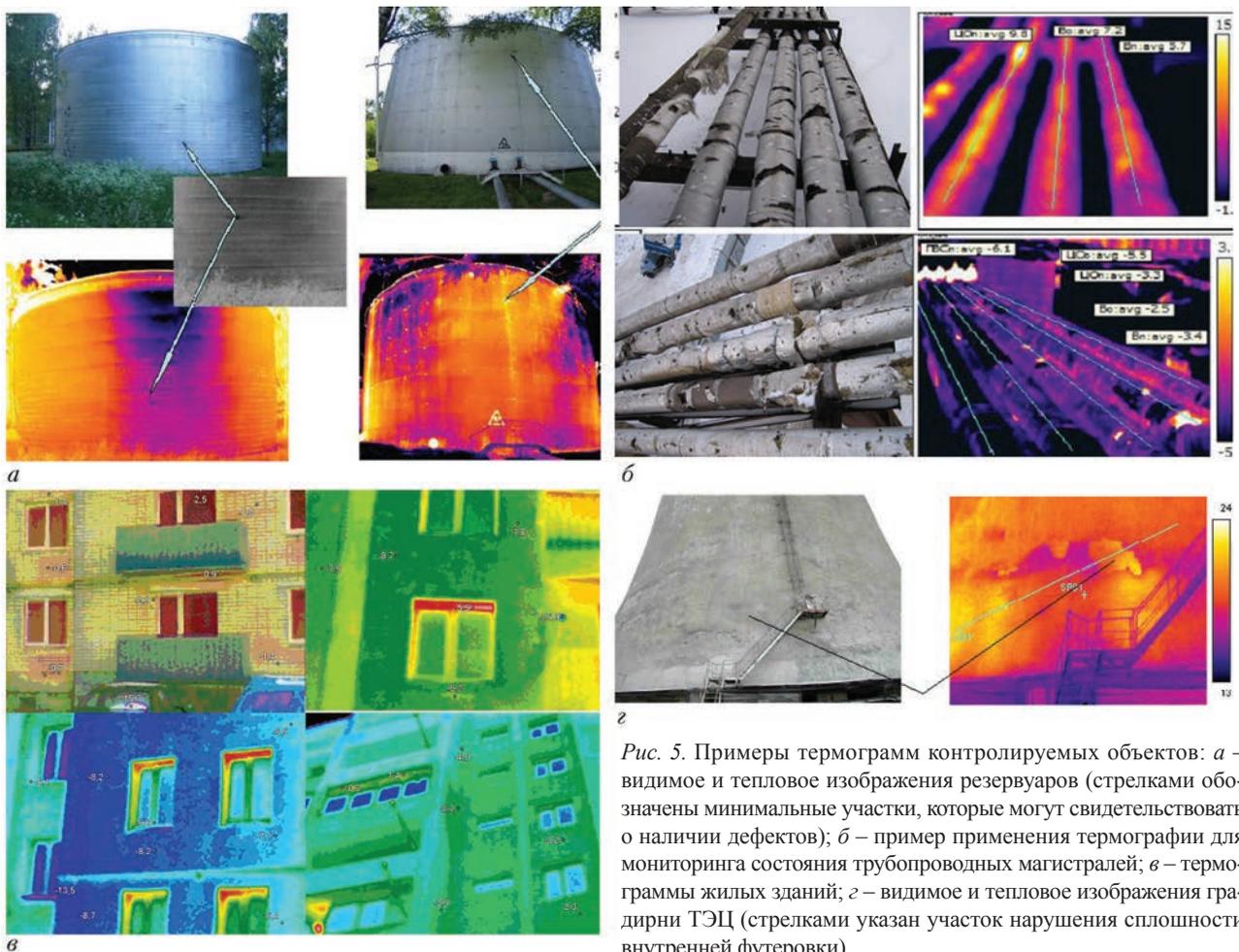


Рис. 5. Примеры термограмм контролируемых объектов: а – видимое и тепловое изображения резервуаров (стрелками обозначены минимальные участки, которые могут свидетельствовать о наличии дефектов); б – пример применения термографии для мониторинга состояния трубопроводных магистралей; в – термограммы жилых зданий; z – видимое и тепловое изображения градирни ТЭЦ (стрелками указан участок нарушения сплошности внутренней футеровки)

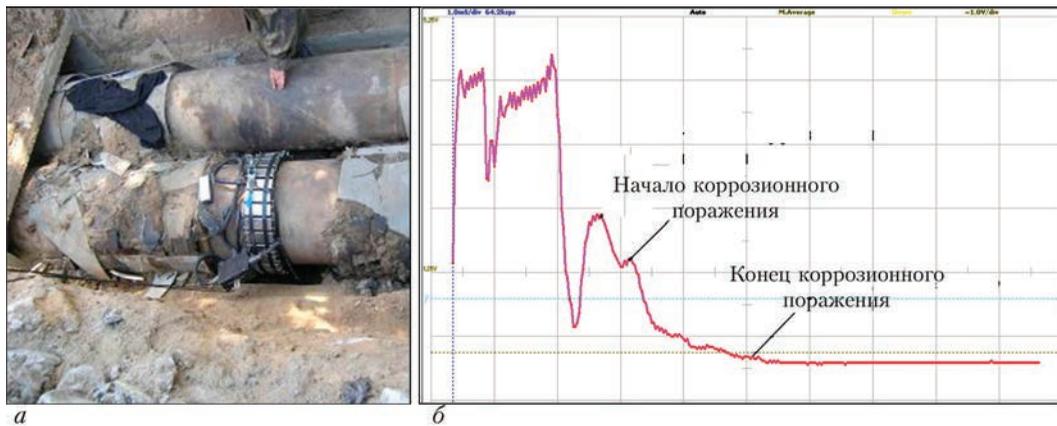


Рис. 6. Контроль подземного участка действующей теплотрассы (а) и осциллограмма эхо-сигнала от коррозионного поражения трубопровода (б)

эксплуатации ответственного объекта, что выполняется сейчас на оборудовании АЭС.

Такой мониторинг состояния сварных металлоконструкций, определение точных размеров трещиноподобных несплошностей в сварных соединениях и основном металле при диагностических инспекциях ответственных и тяжелонагруженных конструкций должен быть введен на всех ответственных объектах. Эта технология используется во всех странах ЕС для обследования технологического оборудования, различных металлоконструкций. Технология TOFD многократно использовалась на различных предприятиях Украины, в частности, на нефтеперерабатывающих заводах, магистральных трубопроводах, АЭС и др. Ее должны освоить все экспертно-технические центры.

Изучение зоны термического влияния. Зона термического влияния (ЗТВ) сварных соединений часто более опасна, чем сварные швы. Разработана технология для отдельной регистрации дефектов шва и дефектов металла ЗТВ при автоматизированном ультразвуковом контроле (АУЗК), создан соответствующий акустический блок (рис. 7) [14]. Пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП) этого блока посылают в металл зондирующие импульсы и принимают эхо-сигналы от дефектов каждый в своей зоне. Для идентификации эхо-сигналов от дефектов в шве и от дефектов околошовной зоны используются амплитудный и временной признаки принятых эхо-сигналов.

Технология с отдельной регистрацией дефектов в сварном шве и металле ЗТВ сварного шва важна при эксплуатации магистральных трубопроводов, которые обычно разрушаются по околошовной зоне. Возможно применение этой технологии в других отраслях промышленности при производстве сварных конструкций.

Хорошие результаты показала промышленная проверка установок АУЗК НК205, НК106 на Харьковском трубном заводе.

Ультразвуковые компьютеризированные методы контроля ответственных объектов основаны на технологии фазированных антенных решеток, которыми сейчас занимаются во всем мире.

Преобразователь фазированной решетки представляет множество миниатюрных пьезоэлектрических элементов, объединенных в одном датчике. Управление каждым элементом решетки выполняется программно от компьютера или специального микропроцессора, обеспечивающего возможность изменения угла излучения фазированного датчика.

Этот метод позволяет получить наглядное изображение дефектов контролируемого объекта, что значительно облегчает понимание полученных результатов, повышая их точность.

Ультразвуковая толщинометрия – одна из самых распространенных технологий. Толщинометрия широко используется для оценки фактического значения толщины стенок элементов металлических конструкций в местах, недоступных для измерения толщины механическим измерительным инструментом. Ультразвуковая толщинометрия позволяет оценить степень расслоения и потери металла в процессе его эксплуатации. Этот метод обеспечивает высокую точность определения толщины только в том случае, если он выпол-

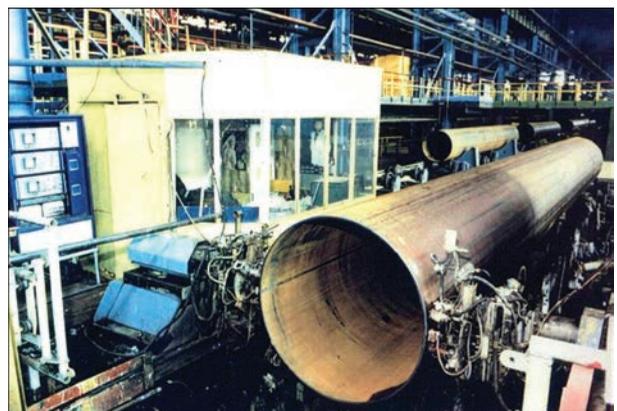


Рис. 7. Система АУЗК с отдельной фиксацией дефектов шва и металла ЗТВ околошовной зоны

няется правильно. Профессиональное обучение технологии толщинометрии является залогом правильной диагностики.

Контроль герметичности сварных соединений различных изделий и сооружений зависит от особенностей объектов (сосуды давления, баллоны, трубопроводы, резервуары, топливные баки, силовые гидросистемы, листовые сварные конструкции с односторонним доступом и прочее). Для прецизионных исследований применяется оборудование для масс-спектрометрического, галогенного, химического контроля. Для более простых задач используется контроль жидкостным, пузырьковым и другими методами. По указанным видам контроля герметичности, отличающимся производительностью и чувствительностью, готовятся и аттестуются специалисты по Международному стандарту ISO 9712, разрабатываются технологические регламенты, которые согласовываются в разрешительных структурах.

Технологические структуры капиллярного контроля (КК) сварных соединений и литых изделий различных узлов машин, механизмов и

промышленных объектов осуществляется цвето-контрастным или люминесцентным методами с использованием дефектоскопических материалов ведущих мировых производителей. Для выполнения КК создан передвижной стенд (рис. 8), оборудованный вытяжкой и другими средствами для эффективного контроля [15].

Стенд изготавливается по индивидуальным заказам экспертно-технических организаций. Капиллярный метод НК является одним из самых распространенных, применяется для обследования ответственных объектов, преимущественно из цветных металлов, нержавеющей стали, но в отличие от других методов эта технология несет и большое количество перебраковок, дает много ложных, ошибочных индикаций. Поэтому для капиллярного метода важно иметь хороший практический опыт и соответствующее недорогое оборудование (см. рис. 8). Подвижной стенд для НК оборудован вытяжкой, ультразвуковой камерой очистки поверхности и другими полезными технологическими приспособлениями.

Обследования резервуаров различного назначения трубопроводов для хранения нефтепродуктов, жидкого аммиака, спиртов и других жидкостей (рис. 9) требует применения разных методов НК.

Так, технический регламент по обследованию резервуаров для хранения нефтепродуктов, жидкого аммиака, спиртов, нефтепродуктов включает визуальный контроль, измерение толщины листов стенки, днища и кровли, контроль герметичности днища, измерение отклонений стенки от вертикали, измерение проседания днища, а также оценку коррозионных повреждений, расчет внутренних механических напряжений. Поэтому подготовка и выдача заключений в соответствии с требованиями «Правил технической эксплуатации резервуаров» является ответственной и длительной процедурой, за которой обычно следуют ремонтные работы.

ИЭС предлагает не только современные технологии в области НК и ТД, но и ведет разработку соответствующей нормативно-технической документации на конкретные технологические процессы с учетом требований международных и европейских стандартов.



Рис. 8. Подвижной стенд для капиллярного контроля, рекомендуемый для всех экспертно-технических центров



Рис. 9. Контроль резервуаров



Выводы

Взятый Украиной курс на евроинтеграцию требует более тщательной организации НК и технической диагностики в стране. Представленные современные методы НК обеспечивают возможность полномасштабного обследования объектов повышенной опасности, минимизируя затраты на выполнение таких работ.

1. Патон Б.Е., Троицкий В.А. Основные направления работ ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины по совершенствованию неразрушающего контроля сварных соединений // Техн. диагностика и разруш. контроль. – 2013. – № 4. – С. 13–29.
2. Карманов М.Н. Рынок услуг неразрушающего контроля продолжает расти // Информ. бюл. УТ НКТД «НК-Информ». – 2014. – № 4. С. 2–3.
3. Троицкий В.А. Основные тенденции развития неразрушающего контроля металлоконструкций // Техн. диагностика и разруш. контроль. – 2012. – № 3. – С. 67–70.
4. Троицкий В.А. Мониторинг больших площадей корабельных и мостовых конструкций в свете проекта ShipInspector // Территория NDT. – 2013. – № 1. – С. 50–54.
5. Троицкий В.А., Карманов М.Н., Горбик В.М. Опыт применения низкочастотного ультразвукового контроля для мониторинга состояния технологических трубопроводов // Территория NDT. – 2015. – № 1. – С. 44–48.
6. Троицкий В.А., Глуховский В.Ю. Повышение эффективности тепловизионной диагностики потенциально опасных и удаленных объектов // Там же. – 2014. – № 3. – С. 36–38.
7. Троицкий В.А. Флэш-радиография // Там же. – 2013. – № 4. – С. 44–49.

8. Карманов М.Н., Шалаев В.А. Модульные системы цифрового радиационного контроля. Сварка и родственные технологии – настоящее и будущее // Межд. конф. – 25–28 нояб. 2013 г. Тез. докл.: ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. – Киев, 2013. – С. 147–148.
9. В.А. Троицкий, М.Н. Карманов, Н.Г. Белый, В.Н. Бухенский. Повышение точности измерений при тангенциальном радиационном просвечивании // Матер. 19-й Межд. конф. «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики». – Гурзуф. 3–7 окт. 2011 г. – С. 36–39.
10. Троицкий В.А. Подвижное локальное намагничивание металлоконструкции при магнитопорошковом контроле // Техн. диагностика и разруш. контроль. – 2014. – № 1. – С. 16–22.
11. Troitskiy V. Devices for the Movable Local Multidirectional Magnetization of Metal Structures in Magnetic Particle Testing // Materials Evaluation. – 2015. – 73, № 6. – P. 675–683.
12. Troitskiy V. Multidirectional Local Magnetization of Extended Metal Structures in Magnetic Particle Testing // Ж. Японского общества JSND Journal. – 2015. – 64, № 2.
13. Давыдов Е., Шекеро А., Миховски М. Алексиев А. Пространственно-временной анализ дифрагированных сигналов с целью увеличения точности измерения размеров дефектов методом TOFD/Сб. науч. докл. «Акустика». – 2009. – Вып. 11. – С. 76–87
14. Трубная промышленность. Повышение качества производимой продукции за счет внедрения новейших средств автоматизированного неразрушающего контроля / А.В. Юрченко, А.П. Тимошенко, И.Я. Шевченко и др. // Территория NDT. – 2012. – № 3. – С. 62–67.
15. Посыпайко Ю.Н. Разработки ИЭС им. Е.О. Патона в области контроля герметичности сварных соединений // Сб. тез. Междунар. конф. «Сварка и родственные технологии – настоящее и будущее», 25–26 нояб. 2013 г.: Киев: ИЭС им. Е.О. Патона, 2013. – С. 150.

Intensive development of NDT techniques for evaluation of the condition of higher hazard industrial facilities has been observed in recent years. This paper gives a description of advanced NDT technologies developed by PWI of NASU. Possibilities and features of practical application of these technologies in industry are discussed. 15 References, 9 Figures.

Keywords: flash-radiography, tangential X-ray screening, mobile local magnetization, laser tomography, tightness control

Поступила в редакцию
25.11.2015



РОЗРОБКА ВІБРОДІАГНОСТИЧНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ДЕФЕКТІВ ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ НЕСТАЦІОНАРНОЇ СТАТИСТИЧНОЇ ОБРОБКИ ВІБРАЦІЙНИХ ТА АКУСТИЧНИХ КОЛИВАНЬ

І.М. ЯВОРСЬКИЙ, Р.М. ЮЗЕФОВИЧ, І.Б. КРАВЕЦЬ, І.Й. МАЦЬКО, І.Г. СТЕЦЬКО
ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАНУ. 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5. E-mail: vgryb@mail.ru

Представлено багатомірну модель стохастичних вібраційних сигналів у вигляді взаємозв'язаних періодично корельованих випадкових процесів. Проаналізовані алгоритми й створено програмне забезпечення для обчислення за експериментальними даними взаємоспектральної густини та взаємоспектральних компонентів періодично нестационарних випадкових вібрацій, а також середньочасової та покомпонентної функції когерентності. Наведені технічні характеристики розробленої вібродіагностичної системи ПУЛЬС з керованими частотними характеристиками. Розглянуто результати, отримані з використанням цієї системи при виконанні вібраційних обстежень промислових об'єктів України. Бібліогр.7, рис. 6.

Ключові слова: багатомірні нестационарні вібраційні сигнали, взаємкореляційний та взаємоспектральний аналізи, функція когерентності, діагностичні ознаки, вібродіагностична система

Робота направлена на вивчення зв'язків між імовірнісними характеристиками багатомірних періодично нестационарних вібраційних сигналів з параметрами, що описують технічний стан об'єктів тривалої експлуатації (машин і агрегатів з циклічними режимами роботи, трубопроводів) та розробку нових ефективних методів і засобів їх контролю та діагностики. Метою проекту було створення віброакустичної переносної системи для діагностики зубчастих передач, підшипникових вузлів, валів великих механічних систем, підземних комунікацій та для ідентифікації джерел вібраційних коливань. В основу роботи покладено розробку спектральної теорії багатомірних періодично нестационарних вібраційних сигналів та методів їх емпіричного спектрального аналізу; розробку і створення блоків одночасного відбору вібраційних сигналів у різних точках об'єкта за допомогою перетворювачів механічних коливань, блока попередньої обробки і введення даних у персональний комп'ютер; обґрунтування алгоритмів і створення алгоритмічного забезпечення для визначення параметрів сигналів, обґрунтування діагностичних ознак для виявлення дефектів і їх розділення; виготовлення, налагодження, випробовування інформаційно-вимірювальної системи ПУЛЬС при проведенні вібраційних обстежень промислових об'єктів України.

Імовірнісні характеристики взаємозв'язаних періодично нестационарних вібраційних сигналів. Математична модель вібраційних сигналів у ви-

гляді періодично корельованих випадкових процесів (ПКВП) дає можливість описати дві важливі їх властивості: циклічність та стохастичність. Перша з них зумовлена циклічними детермінованими силами, що виникають у процесі роботи механізмів, а друга пов'язана з процесами тертя, спонтанними ударами, турбулентністю мастил і т. п. При цьому взаємодія стохастичності та циклічності є ознакою виникнення дефекту. Така взаємодія, як показали наші попередні дослідження, може бути описана імовірнісними характеристиками ПКВП: кореляційною функцією, спектральною густиною та їх коефіцієнтами Фур'є. З використанням цих характеристик дефекти вдається виявляти вже на ранніх стадіях розвитку [1–3].

У випадку складних та великих механічних систем доцільно використовувати набір первинних перетворювачів, розміщених на об'єкті, оскільки місце виникнення дефекту є априорі невідомим. При цьому віброакустичні хвилі поширюються й досягають первинних перетворювачів за різних умов. Використання взаємкореляційного та взаємоспектрального аналізів уможливорює локалізацію дефектів і розділення їх джерел, що дозволяє розробити відповідну методику неруйнівного контролю стану механічних систем, розширюючи тим самим можливості одномірної діагностики.

Взаємкореляційна функція зв'язаних ПКВП $\xi(t)$ і $\eta(t)$ є періодичною функцією часу

$$b_{\xi\eta}(t, u) = E \overset{\circ}{\xi}(t) \overset{\circ}{\eta}(t + u) = b_{\xi\eta}(t + T, u),$$



$\overset{\circ}{\xi}(t) = \xi(t) - m_{\xi}(t)$, $m_{\xi}(t) = E\xi(t)$, $\overset{\circ}{\eta}(t) = \eta(t) - m_{\eta}(t)$, $m_{\eta}(t) = E\eta(t)$ і може бути представлена рядом Фур'є:

$$b_{\xi\eta}(t, u) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} B_k^{(\xi\eta)}(u) e^{ik\omega_0 t}, \quad \omega_0 = \frac{2\pi}{T}.$$

Величини $B_k^{(\xi\eta)}(u)$ називають взаємочореляційними компонентами. Взаємочореляційні компоненти вищих номерів $B_k^{(\xi\eta)}(u)$, $k \neq 0$, характеризують зв'язки між властивостями нестационарності двох ПКВП-сигналів. Періодично змінюється за часом і взаємоспектральна густина

$$f_{\xi\eta}(\omega, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} b_{\xi\eta}(t, u) e^{-i\omega u} du = \sum_{k \in \mathbb{Z}} f_k^{(\xi\eta)}(\omega) e^{ik\omega_0 t},$$

де

$$f_k^{(\xi\eta)}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} B_k^{(\xi\eta)}(u) e^{-i\omega u} du.$$

Виходячи з гармонічних представлень ПКВП-сигналів:

$$\xi(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} \xi_k(t) e^{ik\omega_0 t}, \quad \eta(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} \eta_k(t) e^{ik\omega_0 t},$$

де $\xi_k(t)$ і $\eta_k(t)$ – стаціонарно зв'язані випадкові процеси, для взаємочореляційних і взаємоспектральних компонентів маємо:

$$B_k^{(\xi\eta)}(u) = \sum_{q \in \mathbb{Z}} R_{q-k, q}^{(\xi\eta)}(u) e^{iq\omega_0 u},$$

$$f_k^{(\xi\eta)}(\omega) = \sum_{q \in \mathbb{Z}} f_{q-k, q}^{(\xi\eta)}(\omega - q\omega_0). \quad (1)$$

При цьому _____

$R_{pq}^{(\xi\eta)}(u) = E\overset{\circ}{\xi}_p(t)\overset{\circ}{\eta}_q(t+u)$, $\overset{\circ}{\xi}_p(t) = \xi_p(t) - m_p^{(\xi)}$, $\overset{\circ}{\eta}_q(t) = \eta_q(t) - m_q^{(\eta)}$, $m_p^{(\xi)} = E\xi_p(t)$, $m_q^{(\eta)} = E\eta_q(t)$; «—» – знак спряження; $f_{pq}^{(\xi\eta)}(\omega)$ – взаємоспектральні густини стаціонарних компонентів $\overset{\circ}{\xi}_p(t)$ і $\overset{\circ}{\eta}_q(t)$.

Зі співвідношень (1) випливає, що $B_k^{(\xi\eta)}(u) \neq 0$, $k \neq 0$, а отже і $f_k^{(\xi\eta)}(\omega) \neq 0$ тільки в тому випадку, коли стаціонарні компоненти $\overset{\circ}{\xi}_p(t)$ і $\overset{\circ}{\eta}_q(t)$ різних номерів $p \neq q$ є корельованими.

Для характеристики пов'язаності двох ПКВП-сигналів у частотній області введемо функцію когерентності:

$$\gamma_k^{(\xi\eta)}(\omega) = \frac{\left| f_k^{(\xi\eta)}\left(\omega + k\frac{\omega_0}{2}\right) \right|}{\left[f_0^{(\xi\eta)}\left(\omega - k\frac{\omega_0}{2}\right) f_0^{(\xi\eta)}\left(\omega + k\frac{\omega_0}{2}\right) \right]^{\frac{1}{2}}}. \quad (2)$$

Ця величина характеризує ступінь корельованості між спектральними компонентами сигналу $\xi(t)$ на частоті $\omega - k\frac{\omega_0}{2}$ і сигналу $\eta(t)$ на частоті $\omega + k\frac{\omega_0}{2}$. Якщо сигнали $\xi(t)$ і $\eta(t)$ є результатами лінійних перетворень одного й того ж ПКВП-сигналу $\zeta(t)$ (рис. 1), то

$$\gamma_k^{(\xi\eta)}(\omega) = \frac{\left| f_k^{(\zeta)}\left(\omega + k\frac{\omega_0}{2}\right) \right|}{\left[f_0^{(\zeta)}\left(\omega - k\frac{\omega_0}{2}\right) f_0^{(\zeta)}\left(\omega + k\frac{\omega_0}{2}\right) \right]^{\frac{1}{2}}}. \quad (3)$$

Зі співвідношення (3) випливає, що функція когерентності двох ПКВП-сигналів, отриманих у результаті різних лінійних перетворень одного й того ж ПКВП-сигналу, дорівнює функції автокогерентності вхідного сигналу. А це означає, що при лінійних перетвореннях функція автокогерентності сигналу не змінюється, тобто є інваріантом.

Періодично-нестационарно зв'язаними два ПКВП-сигнали будуть тільки у випадку, коли існують такі $k \neq l$, що $f_{kl}^{(\xi\eta)}(\omega) \neq 0$. Для характеристики такої зв'язності введемо покомпонентну функцію когерентності:

$$\gamma_{kl}(\omega) = \frac{\left| f_{kl}^{(\xi\eta)}(\omega) \right|}{\left[f_{kk}^{(\xi)}(\omega) f_{ll}^{(\eta)}(\omega) \right]^{\frac{1}{2}}}. \quad (4)$$

Ця функція, як і величина (4), не змінюється при лінійних перетвореннях.

Щоб розрізнити величини (3) і (4), першу з них називатимемо середньочасовою функцією автокогерентності. Відмінність від нуля функції $\gamma_{kl}^2(\omega)$ для будь-яких $k \neq l$, як і функції $\gamma_k^2(\omega)$ для будь-яких $k \neq 0$, є необхідною і достатньою умовою періодично-нестационарної зв'язаності двох ПКВП-сигналів.

Функція когерентності (3) є загальною характеристикою пов'язаності властивостей нестационарності сигналів. Вона визначає ступінь корельованості спектральних компонентів сигналів. Покомпонентна функція когерентності (4), характеризуючи кореляційні зв'язки між випадковими

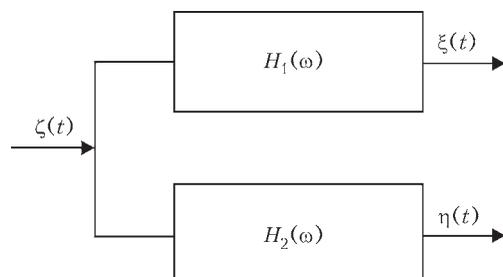


Рис. 1. Схема формування сигналів ($H_1(\omega)$ і $H_2(\omega)$ – передавальні функції лінійних перетворень)



процесами, які модулюють основні гармонічні складові сигналів, дає можливість більш детально проаналізувати структуру цієї пов'язаності. Такий аналіз є важливим з тієї причини, що стохастична модуляція гармонік зумовлена власне появою дефектів, тому його результати можуть бути використані для більш ефективного розділення дефектів і встановлення їх типів.

Обчислення функції когерентності (3) за експериментальними даними може бути проведено на основі попереднього оцінювання авто- та взаємоспектральних компонентів [4]:

$$\hat{f}_k^{(\xi, \eta)}(\omega) = \frac{\Delta u}{2\pi} \sum_{r=-L}^{L-1} k(r\Delta u) \hat{B}_k^{(\xi, \eta)}(r\Delta u) e^{-i\omega r\Delta u}, \quad (5)$$

$$\hat{f}_k^{(\xi \eta)}(\omega) = \frac{\Delta u}{2\pi} \sum_{r=-L}^{L-1} k(r\Delta u) \hat{B}_k^{(\xi \eta)}(r\Delta u) e^{-i\omega r\Delta u}, \quad (6)$$

де $k(u)$ – кореляційне вікно.

Похибка такого обчислення функції когерентності буде допустимою, якщо величини зміщень та дисперсій оцінок спектральних компонентів не перевищуватимуть певних наперед заданих величин.

Для обчислення покомпонентної функції когерентності (4) потрібно спочатку з реалізацій ПКВП-сигналів виділити їх стаціонарні компоненти і на основі отриманих даних провести оцінювання їх авто- та взаємоспектральних густин. Один з методів виділення стаціонарних компонентів полягає в застосуванні перетворення [3, 5]

$$\xi_k(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t-\tau) \xi(\tau) e^{-ik\omega_0\tau} d\tau,$$

де $h(\tau) = \frac{1}{\pi\tau} \sin \frac{\omega_0\tau}{2}$ – імпульсний відгук смугово-го фільтра, передавальна функція якого має вигляд

$$H(\omega) = \begin{cases} 1, & \omega \in \left[-\frac{\omega_0}{2}, \frac{\omega_0}{2}\right], \\ 0, & \omega \notin \left[-\frac{\omega_0}{2}, \frac{\omega_0}{2}\right]. \end{cases}$$

Оцінки авто- та взаємоспектральних густин можна обчислити, використовуючи метод Блекмана–Г'юкі:

$$\hat{f}_{kl}^{(\xi, \eta)}(\omega) = \frac{\Delta u}{2\pi} \sum_{r=-L}^{L-1} k(r\Delta u) \hat{R}_{kl}^{(\xi, \eta)}(r\Delta u) e^{-i\omega r\Delta u}, \quad (7)$$

$$\hat{f}_{kl}^{(\xi \eta)}(\omega) = \frac{\Delta u}{2\pi} \sum_{r=-L}^{L-1} k(r\Delta u) \hat{R}_{kl}^{(\xi \eta)}(r\Delta u) e^{-i\omega r\Delta u}, \quad (8)$$

де $\hat{R}_{kl}^{(\xi, \eta)}(r\Delta u)$ і $\hat{R}_{kl}^{(\xi \eta)}(r\Delta u)$ – оцінки відповідних кореляційних функцій.

Щоб забезпечити потрібні похибки оцінок функцій когерентності (3) і (4), параметри обробки необхідно вибирати так, щоб величини похи-

бок обчислення (5)–(8) не перевищували допустимих меж.

Вібродіагностична система ПУЛЬС. На основі розробленої методології аналізу стохастичних коливань з використанням сучасних елементів мікроелектроніки та відповідного програмного забезпечення у Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка НАН України в лабораторії вібродіагностики створена мобільна вібродіагностична система ПУЛЬС. Вона призначена для відбору та обробки вібраційних сигналів обертових механізмів з метою виявлення і попередження дефектів на ранніх стадіях їх зародження, для попередження аварійних ситуацій на турбогенераторах, нафтоперекачувальних станціях, бурильних установках, для діагностики тіл обертання, електродвигунів, газоперекачувальних агрегатів, порталних кранів, електрогенеруючих установок (високовольтні трансформатори в тому числі) і т.п.

Структурна схема вібраційної діагностичної системи ПУЛЬС показана на рис. 2.

Система складається з таких основних вузлів: диференціальних підсилювачів сигналу для роботи як з електронними, так і п'єзокерамічними давачами віброприскорення; фазолінійних фільтрів 8-го порядку; схеми управління частоти зрізу фільтрів низьких частот; швидкодіючого аналого-цифрового перетворювача E20-10 фірми L-card [6, 7]; каналу синхронізації відбору сигналів; модуля регулятора температури; блоку живлення та персонального комп'ютера.

Для узгодження п'єзокерамічних давачів віброприскорення використовуються перетворювач заряду, побудований на спеціалізованій інтегральній мікросхемі фірми Analog Devices типу AD745. З метою розширення функціональних можливостей, а також використання розроблених електронних давачів віброприскорення на базі сенсора ADXL001, що добре зарекомендували себе в роботі в реальних умовах, додатково введена схема узгодження сигналу згаданого сенсора з аналого-цифровим перетворювачем.

На рис. 3 представлена система ПУЛЬС.

Керування смугою пропускання фазолінійних фільтрів низьких частот встановлюється дискретно в широкому діапазоні значень на початку відбору вібраційних сигналів. Послаблення (заникання) сигналу на подвійній частоті зрізу ($2F_{\text{cd}3\text{co}}$) становить не менше, як 43 дБ (141 раз по напрузі).

У якості давача віброприскорення вибраний п'єзокерамічний акселерометр типу ABC117, власна резонансна частота якого знаходиться в межах 100 кГц.

Основою системи є швидкодіючий модуль аналого-цифрового перетворення E20-10 з USB2 інтерфейсом. Його основні властивості: забезпечення неперервного 16-бітового збору даних по USB2

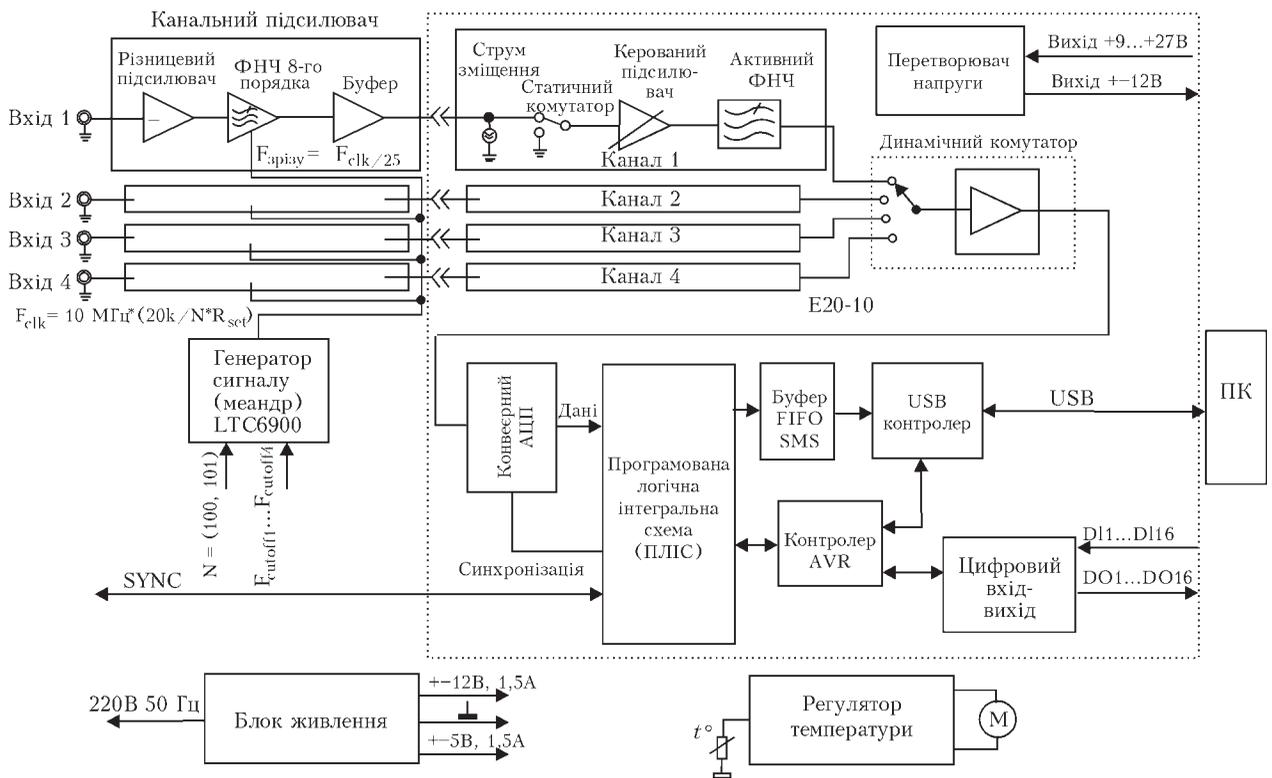


Рис. 2. Структурна схема вібраційної діагностичної системи ПУЛЬС

інтерфейсу; можливість програмного встановлення чутливості по кожному із каналів; частота перетворення аналого-цифрового перетворювача встановлюється програмно від 1 до 10 МГц; багаторежимна синхронізація старту збору даних.

Максимальна тактова частота аналого-цифрового перетворювача складає 10 МГц, що дасть можливість обробляти вхідні аналогові сигнали зі

смугою пропускання до 1,25 МГц при одночасно включених чотирьох каналах відбору інформації.

Дослідження вібраційного стану промислових об'єктів. Наведемо приклади застосування покомпонентної функції когерентності (4) для розділення джерел дефектів підшипників ковзання турбоагрегатів Добротвірської ТЕС та встановлення їх типів. Моніторинг вібраційного стану підшипників проводився за допомогою переносної вібродіагностичної системи ПУЛЬС. Акселерометри Analog Device розміщувалися на корпусі вузла. Частота відбору 2 кГц, час відбору 20 с.

Статистична обробка сигналів проводилася з використанням розвинутих авторами проекту методів статистики ПКВП, при цьому попередньо здійснювався пошук прихованих періодичностей у часових змінах як детермінованої, так і стохастичної складових сигналів. Оцінки періодів нестационарності знаходилися за допомогою компонентного методу та методу найменших квадратів. На початкових стадіях досліджень була виявлена відносно слабка взаємодія детермінованої та стохастичної складових, про

Основні електричні параметри давача віброприскорення

Коефіцієнт перетворення в амплітудному значенні по напрузі	0,11±0,016 мВ/г
Коефіцієнт перетворення в амплітудному значенні по заряду	0,24±0,08 пКл/г
Ємність, не більше	2200±330 пФ
Власна резонансна частота, не менше	90 кГц
Нерівномірність амплітудно-частотної характеристики в діапазоні частот	від 100 до 5000 Гц ± 1дБ
Основна похибка, не більше	±10 %

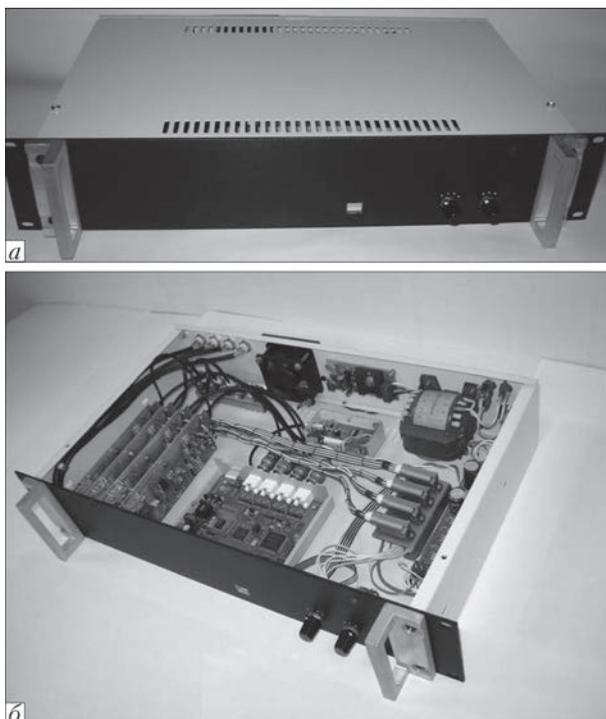


Рис. 3. Система ПУЛЬС: а – зовнішній вигляд; б – внутрішній

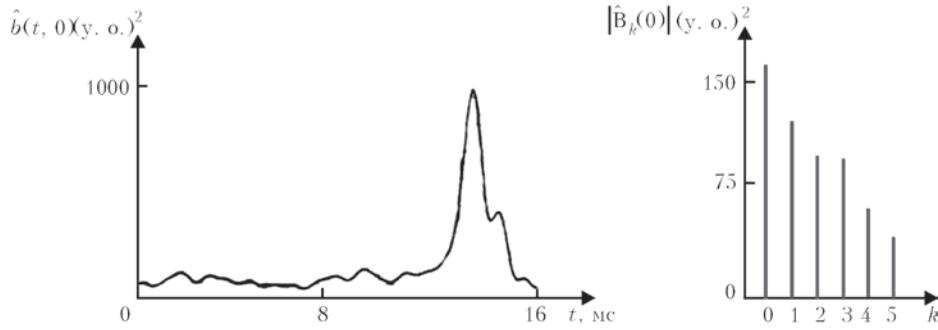


Рис. 4. Оцінки дисперсії та її коефіцієнтів Фур'є для розвинутого дефекту

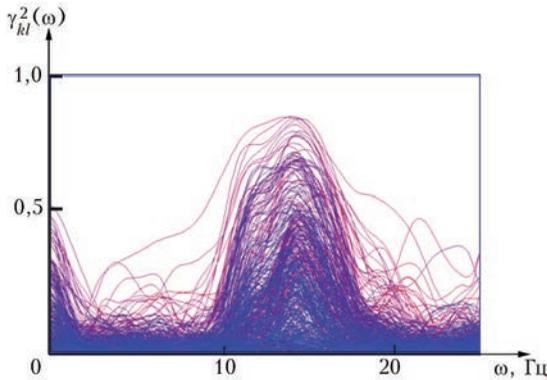


Рис. 5. Оцінки покомпонентних функцій когерентності випадкової складової сигналу

що свідчать відносно незначні зміни з часом оцінок імовірнісних характеристик другого порядку – дисперсії, кореляційної функції та спектральної густини. З розвитком дефекту ці зміни стають дедалі глибшими. На рис. 4 представлені оцінки дисперсії та її коефіцієнтів Фур'є, отримані на основі реалізації вібраційного сигналу, відібраного при розвинутому дефекті. З використанням лінійної смужкової фільтрації [3, 5] були виділені стаціонарні компоненти сигналу і проведено їх взаємкореляційний і взаємспектральний аналізи.

Оцінки покомпонентних функцій когерентності для різних номерів корельованих стаціонарних модулюючих процесів представлені у вигляді сумісних графіків на рис. 5.

Видно, що більшість стаціонарних компонент корелюють між собою в смузі 13...16 Гц, а максимуму функції когерентності досягають в точці, близькій до 16 Гц. Даний факт дає змогу стверджувати про наявність дефекту «обертвий зрив». Такий висновок підтверджується також аналізом оцінок спектральних компонентів ПКВП, які отримуються на основі оцінок взаємспектральних густин стаціонарних компонентів.

Використання покомпонентної функції когерентності виявилось ефективним при встановленні й інших дефектів підшипникових вузлів, в тому числі збільшення зазору між шийкою вала й бабітовим вкладишем та підшипника з дефектом «вихрова змазка». В першому випадку оцінка покомпонентної функції когерентності досягає мак-

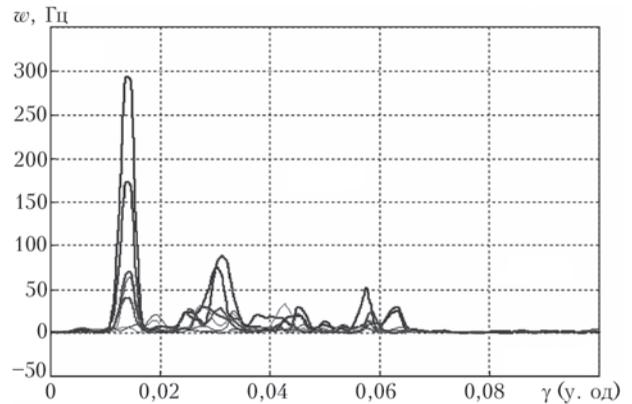


Рис. 6. Покомпонентні функції когерентності підшипника кочення

симуму при 25 Гц, а в другому – 23 Гц, що дає змогу ідентифікувати типи дефектів.

З використанням покомпонентної функції когерентності було проведено ідентифікацію дефектів підшипника кочення механізмів на ряді підприємств України. На рис. 6 представлено функцію когерентності двовірних вібраційних сигналів підшипника кочення SKF 7212 BECBM, який міститься в компресорі низького тиску на підприємстві «Компанія ЕНЗИМ «ТМ «Львівські дріжджі». З рисунку видно, що на покомпонентних функціях підшипника кочення є піки, які зумовлені одним і тим же дефектом, а саме дефектом підшипника кочення на зовнішньому кільці.

Верифікація підходу також була проведена з використанням вібротехнічного стенду у лабораторії вібродіагностики та при обробці модульованих вібраційних сигналів з дефектами на зовнішньому і внутрішньому кільцях. Така симуляція була проведена шляхом використання числового розв'язування нелінійних диференціальних рівнянь 2-го порядку, які описують двовірні вібраційні сигнали підшипників кочення.

Висновки

Розроблено нову багатоканальну переносну вібродіагностичну систему ПУЛЬС з керованими частотними характеристиками. Завдяки використанню швидкодіючого аналого-цифрового перетворювача при відповідних давачах система дає можливість реєструвати сигнали до 5 МГц при одноканальному, 2,5 МГц при двоканальному та



1,25 МГц при чотириканальному варіантах відбору вібраційних сигналів. Система може здійснити попередню обробку вібраційних сигналів у реальному часі з можливістю зберігання їх для подальшої обробки.

Створено алгоритмічне забезпечення для взаємодіяційного і взаємодіального аналізу періодично нестационарних вібраційних сигналів, в тому числі для обчислення введених функцій когерентності двох типів. Перша з них є загальною характеристикою пов'язаності властивостей нестационарності сигналів, вона визначає ступінь корельованості гармонічних складових сигналів. Друга – характеризує кореляційні зв'язки між випадковими процесами, які модулюють основні гармонічні складові сигналів, що дає можливість більш детально проаналізувати структуру цієї пов'язаності. Обидві функції когерентності є інваріантами відносно лінійних перетворень. Оскільки поява дефектів супроводжується нелінійними ефектами, то ці величини доцільно використовувати при розділенні джерел дефектів, а їх частотні залежності – для встановлення їх типів.

З використанням покомпонентної функції когерентності проведено аналіз дефектів, які виникають у підшипникових вузлах промислового обладнання на підприємствах України.

1. Назарчук З.Т., Яворський І.М., Михайлишин В.Ю. Застосування теорії періодично корельованих випадкових процесів до раннього виявлення дефектності обертових систем // 3-я Міжн. конф. «Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій». – Львів, 2004. – С. 403–410.
2. Методи і засоби ранньої діагностики обертових механізмів / І.М. Яворський, П.П. Драбич, І.Б. Кравець та ін. // Праці Міжн. наук.-техн. конф. «Ресурс, надійність та ефективність використання енергетичного обладнання». – Харків, 2010. – С. 31–38.
3. Яворський І.М. Математичні моделі та аналіз стохастичних коливань. – Львів: ФМІ НАН України, 2013. – 802 с.
4. Когерентний взаємодіальний аналіз періодично нестационарних вібраційних сигналів / І.М. Яворський, Р.М. Юзефович, І.Й. Мацько, В.Б. Шевчик // Відбір і обробка інформації. – 2014. – № 41 (117). – С. 12–19.
5. Linear filtration methods for statistical analysis of periodically correlated random processes - Part II :Harmonic series representation / I. Javorskyj, J. Leskow, I. Kravets et al. // Signal Processing. – 2011. – 91. – P. 2506–2519.
6. Гарманов А.В. Подключение электроизмерительных приборов. Решение вопросов электросовместимости и помехозащищенности. – М.: Изд-во Машиностроение, 2003. – 39 с.
7. Гарманов А.В. Устройство для мобильных систем E20-10. Руководство пользователя. – М., 2012. – 61 с.

The paper presents a multidimensional model of stochastic vibration signals in the form of interrelated periodically correlated random processes. Algorithms were analyzed, and software was developed for computation by experimental data of mutually spectral density and mutually spectral components of periodically non-stationary random vibrations, as well as time-averaged and componentwise coherence functions. Technical characteristics of the developed vibrodiagnostic system PULS with controllable frequency characteristics are given. Results, obtained with application of this system during performance of vibratory analysis of industrial facilities of Ukraine, are considered. 7 References, 6 Figures

Keywords : multidimensional non-stationary vibration signals, cross-correlation and mutually spectral analyses, coherence function, diagnostic indications, vibrodiagnostic system

Надійшла до редакції
10.08.2015

КАЛЕНДАРЬ КОНФЕРЕНЦИЙ И ВЫСТАВОК ПО НК В 2016 г.

Событие	Дата и место проведения	Контакты
6 th Conference on Industrial Computed Tomography	09.02-12.02.2016 Wels/Austria	www.3dct.at/cms2/index.php/en/welcome-2
16 th European ALARA Network Workshop	14.03-16.03.2016 Berne/ Switzerland	www.eu-alara.net
Control - Internationale Fachmesse für Qualitätssicherung	26.04-29.04.2016 Stuttgart/ Germany	www.control-messe.de/control
19 th World Conference on Non-Destructive Testing	13.06-17.06.2016 Miinchen/ Germany	www.wcndt2016.com
Inno Trans 2016	20.09-23.09.2016 Berlin/Germany	www.innotrans.de

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ ПРИ ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ НАГРУЗКАХ И ТЕМПЕРАТУРАХ

И.И. ЛУЧКО, В.В. КОВАЛЬЧУК, О.М. ВОЗНЯК

Днепропетр. нац. ун-т железнодорож. транспорта им. Академика В. Лазаряна. 79052, г. Львов, ул. Иванны Блажкевич, 12, а.
E-mail: kovalchuk.diit@mai.ru

Разработаны научные основы нового устройства для измерения и оценки напряженно-деформированного состояния транспортных сооружений при переменных температурах и нагрузках. Техническая задача, которая решается данной работой, заключается в принятии по результатам мониторинга транспортных сооружений научно обоснованных решений о необходимости в восстановительном ремонте отдельных элементов, контроля постепенного снижения несущей способности этих элементов конструкции, установлении их фактического технического состояния и остаточного ресурса. Библиогр. 29, табл. 1, рис. 5.

Ключевые слова: устройство для измерения напряженно-деформированного состояния, нагрузки, несущая способность, транспортные сооружения

Транспортные сооружения и их отдельные элементы во время строительства и в течение срока службы испытывают переменные нагрузки и температурные воздействия. Температурные климатические воздействия учитываются как временные нагрузки, входящие в расчетные соотношения. Одной из возможных причин преждевременного разрушения материалов является отсутствие учета реальных условий работы материалов в составе конструкции.

Напряжения от динамических нагрузок вместе с температурными градиентами, возникающими в сечениях конструкций, способствуют появлению излишних напряжений, которые могут стать причиной преждевременного разрушения материалов [1–5]. Учитывая, что срок надежной эксплуатации, установленный для транспортных сооружений исчерпывается, возникает необходимость в определении остаточного ресурса их надежной эксплуатации и постоянного контроля за изменениями физико-механических характеристик материала во время длительной эксплуатации при изменяющихся температурах [1–7]. Поэтому существует потребность в разработке устройства, которое, с целью мониторинга указанных конструкций, регулярно будет фиксировать деформации, возникающие в них. Данные о деформации материала сооружений можно получить с помощью датчиков – тензорезисторов [8–16]. Практическое применение таких датчиков требует разработки измерительных схем и устройств для работы с ними.

Анализ состояния проблемы. На современном этапе для оценки несущей способности транспортных сооружений и качества дорожного и аэродромного покрытия используют инстру-

ментальные и визуальные методы исследований, в том числе различные методы НК, которые являются более рациональными, что объясняется относительно низкой трудоемкостью таких методов, достаточной точностью получаемых результатов для оценки технического состояния дорожных и аэродромных покрытий [17–24].

К основным методам, которые позволяют контролировать состояние бетонных конструкций, относятся: радиометрический метод, ультразвуковой метод, методы местных разрушений, методы ударного воздействия [25–28]. К недостаткам радиометрических методов относится необходимость работы с радиоактивными материалами, наличие остаточной наведенной радиоактивности. На точность измерения прочности при проведении контроля УЗ методом могут влиять тип цемента, условия твердения, возраст конструкции, влажность и температура поверхности, тип поверхности, что, в общем, можно отнести к недостаткам данного метода. Недостатками методов местных разрушений и ударного воздействия является определение характеристик только в локальных точках конструкции. Основным недостатком рассмотренных методов является то, что они требуют построения индивидуальных градуировочных зависимостей по результатам исследований стандартных образцов-кубов, изготовленных из бетона такого же состава и возраста, что и исследуемая конструкция. Непосредственно при этом измеряется некоторая косвенная физическая характеристика, связанная с прочностью корреляционной зависимости. Для установления этой зависимости, а соответственно, и для установления прочности конструкции предварительно необходимо установить градуировочную характеристику между прочностью и



некоторой косвенной характеристикой. Следует отметить, что трудоемкость, сложность и безопасность работ по сложному инструментальному контролю надфундаментных несущих конструкций в условиях действующего производства будут значительно больше периодических геодезических работ по контролю просадок и деформаций в течение их эксплуатации.

По результатам измерений и расчетов характеристик напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов пролетных строений при переменных температурах можно принимать конструктивные решения и использовать материалы, которые продлят срок службы транспортного сооружения.

Исходя из приведенных утверждений можно констатировать, что определение НДС является важной и актуальной задачей, поэтому существует потребность в разработке новых способов и методов определения НДС как металлических, так и железобетонных сооружений.

Методика исследований. Для оценки НДС транспортных сооружений разработано устройство НК таких сооружений [см. 11, 12, 16]. С его помощью измерения проводятся по следующей схеме (рис. 1): сигнал от тензометра 1 поступает на вход аналогового-цифрового преобразователя (АЦП) 2, где определяются параметры измеренного сигнала и средствами программного обеспечения 5 выводятся на табло 3. Данные для дальнейшего использования и обработки накапливаются в памяти 4. Для обеспечения работы измерительной схемы и АЦП используется блок питания 6.

Реальная схема проведения измерений приведена на рис. 2. Данная схема состоит из персонального компьютера 1 (ПК), который питает АЦП 2 и тензометр 3. Информация с тензометра 3 передается на АЦП 2, а из него на ПК 1, который в этом случае выполняет функции информационного табло 3, накопителя информации 4 и программного обеспечения 5 (см. рис. 1).

К компьютеру, который используется при проведении измерений, специальных требований не предъявляется. Одной из его особенностей является наличие в нем жесткого диска с объемом памяти, который будет достаточным для сохранения значительного количества изме-

ренных значений. Желательно, чтобы компьютер был переносным.

Программное обеспечение компьютера должно гарантировать сохранение и резервирование полученных данных, возможность их обработки и визуального воспроизведения.

Рассмотрим особенности схем, используемых в тензометрии, а также приведем методику расчета параметров таких схем при работе с тензодатчиками.

В тензометрии используются две схемы процесса измерений: мостовая и полумостовая (потенциметрическая) [7, 14, 29].

Условие равновесия мостовой схемы определяется соотношением:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3} \quad (1)$$

или $R_1 R_3 = R_2 R_4$. (2)

Зависимость выходного напряжения от значений сопротивлений схемы имеет вид:

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_0 \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}, \quad (3)$$

где $U_0 = E_0 - IR_{\text{ВН}}$ – напряжение питания моста.

В зависимости от способа включения датчиков в плечи мостовой схемы различают мостовые схемы с включением датчиков в одно, два и четыре плеча мостовой схемы [13, 29]. При измерении малых деформаций, вызванных температурными воздействиями, целесообразно применять мостовую схему с включением датчиков в четыре плеча моста (рис. 3).

Такая схема включения целесообразна еще и с той точки зрения, что толщина балки является значительной по сравнению с деформацией и ее противоположные стороны находятся в разных температурных условиях.

Далее рассмотрим принцип определения НДС элементов мостовых конструкций при переменных нагрузках и температурах, который заключается в одновременном измерении деформации объекта и его температуры (с компенсацией темпе-

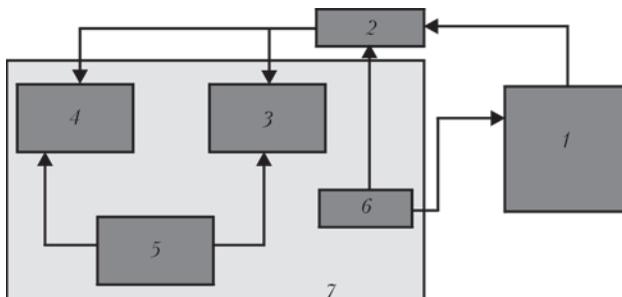


Рис. 1. Обобщенная структурная схема проведения измерений (обозн. см. в тексте)

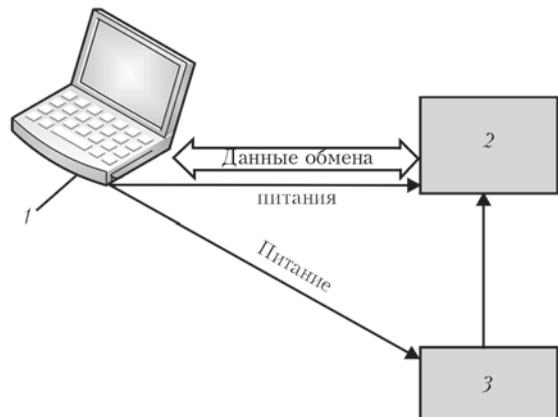


Рис. 2. Реальная схема проведения измерений

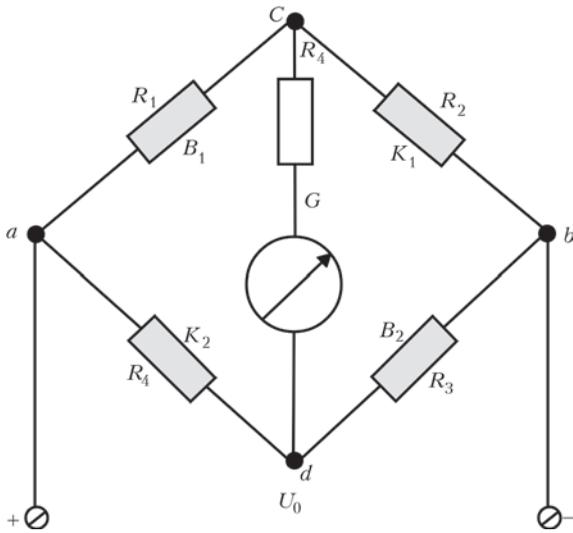


Рис. 3. Мостовая схема включения тензодатчиков в четыре плеча

ратурного воздействия на тензорезисторы). Разработанный подход позволяет определить НДС в достаточно малой окрестности любой точки на поверхности объекта. Он базируется на зависимости сопротивления тензорезисторов (датчиков) от температуры и деформации.

Принцип и способ определения НДС конструкции моста и компенсации температурного воздействия на тензодатчики. Как известно [4, 29], изменение сопротивления чувствительного элемента (ЧЭ) является основным информативным параметром, по которому можно узнать о величине измеренной деформации. Электрическое сопротивление ЧЭ меняется при его деформации. При постоянной температуре T_0 относительное изменение сопротивления тензорезистора $\Delta R/R$ пропорционально линейной деформации ε :

$$\xi = \left. \frac{\Delta R}{R} \right|_{T=T_0} = k\varepsilon, \quad (4)$$

где k – коэффициент тензочувствительности тензорезистора при температуре T ; ΔR – прирост сопротивления ЧЭ, вызванный его деформацией.

Деформация ε ЧЭ при температуре T определяется изменением размеров базы относительно начального значения:

$$\varepsilon = \frac{l_\varepsilon - l}{l} = \frac{\Delta l}{l}, \quad (5)$$

где l – длина базы ЧЭ при температуре T и отсутствии деформации; l_ε – длина базы ЧЭ при температуре T_0 под действием деформации ε .

Поскольку ЧЭ жестко установлен на поверхности объекта, он деформируется вместе с ним и его деформация ε совпадает с линейной деформацией поверхности объекта в направлении оси ЧЭ в месте его установки.

В случае, когда объект находится в одноосном однородном напряженном состоянии, а ось

тензорезистора ориентирована вдоль направления действия напряжений, деформация ЧЭ равна продольной деформации объекта ε , обусловленной напряжением σ . Поэтому, измеряя сопротивление R тензорезистора при действии напряжений на объект, можно вычислить его относительное изменение:

$$\xi = \frac{R_\varepsilon - R}{R}. \quad (6)$$

Из формулы (4) находим продольную деформацию объекта:

$$\varepsilon = \frac{\xi}{k}, \quad (7)$$

при этом напряжение σ определяется как

$$\sigma = E\varepsilon = E \frac{\xi}{k}, \quad (8)$$

где E – модуль Юнга материала объекта.

Рассмотрим электрическую схему измерения прироста сопротивления тензорезистора при его деформации с использованием базовой мостовой схемы.

Напряжение на выходной диагонали cd (см. рис. 3) такого моста при питании моста от источника постоянного напряжения определяется по формуле (3), а при питании схемы от источника постоянного тока напряжение на выходе моста определяется соотношением

$$U_{\text{вых.}} = I \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}, \quad (9)$$

где I – ток питания моста.

Сопротивление тензорезисторов при фиксированной температуре представляют в виде (1). Значения сопротивлений R_1, R_2, R_3, R_4 в мостовой схеме обычно выбирают такими, чтобы при $\varepsilon = 0$ мост был уравновешен. Тогда при питании моста от источника постоянного напряжения получаем

$$R_1 R_3 - R_2 R_4 = 0. \quad (10)$$

С целью уменьшения погрешности измерений целесообразно определять напряжения, действующие в объекте, которые пропорциональны выходному напряжению, поэтому

при питании от источника напряжения:

$$U_{\text{вых.}} = U \frac{R_2 \Delta R}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}, \quad (11)$$

или при питании от источника тока:

$$U_{\text{вых.}} = I \frac{R_2 \Delta R}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}. \quad (12)$$

Если выбрать $R_1 = R_2 = R_3 = R$ и принять во внимание, что $\Delta R \ll R_0$, то получим соответственно:

при питании от источника напряжения:



$$U_{\text{вых.}} = U \frac{\Delta R}{4R} = \frac{U}{4} \xi, \quad (13)$$

при питании от источника постоянного тока:

$$U_{\text{вых.}} = I \frac{\Delta R}{4} = \frac{U}{4} \xi. \quad (14)$$

В первом случае выходное напряжение измерительного моста пропорционально относительному изменению сопротивления тензорезистора, а во втором – абсолютному изменению сопротивления.

Если выбрать $R_1 = R$ и $R_2 = R_3$ и принять дополнительно $R_2 \ll R_0$, то получим

$$U_{\text{вых.}} = U \frac{\Delta R}{R} = U \xi \quad (15)$$

при питании от источника постоянного напряжения, а

$$U_{\text{вых.}} = U \frac{\Delta R}{2} = \frac{I}{2} R \xi \quad (16)$$

при питании мостовой схемы от источника постоянного тока.

Из формулы (15) вытекает, что

$$\varepsilon = \frac{U}{U_{\text{вых.}}} \quad (17)$$

при питании от источника постоянного напряжения, а

$$\varepsilon = \frac{U}{2U_{\text{вых.}}}$$

при питании мостовой схемы от источника постоянного тока (из формулы (16)).

Подставляя полученное значение из формулы (17) в соотношения (6)–(7), получаем формулы для определения одноосного НДС на основе измерений с использованием мостовой схемы:

$$\varepsilon_1 = \frac{U}{kU_{\text{вых.1}}}, \sigma = E \frac{U}{kU_{\text{вых.1}}}; \quad (18)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{U}{kU_{\text{вых.2}}}, \sigma = -E \frac{U}{kU_{\text{вых.2}}}; \quad (19)$$

$$\sigma = \frac{EU}{2k} \left(\frac{1}{U_{\text{вых.1}}} - \frac{1}{U_{\text{вых.2}}} \right). \quad (20)$$

При изменяющихся температурах нужно учитывать зависимость сопротивления ЧЕ как от деформации, так и от температуры:

$$R = R(\varepsilon, T). \quad (21)$$

Учитывая, что электрическое сопротивление современных тензорезисторов практически линейно зависит от деформации, представляем зависимость (21) в следующем виде:

$$R(\varepsilon, T) = R(T) + R(T)k(T)\varepsilon; \quad (22)$$

$$k(T) = \left. \frac{\partial R(\varepsilon, T)}{\partial \varepsilon} \right|_{\varepsilon=0}. \quad (23)$$

Когда температура фиксирована $T = T_0$, формула (22) эквивалентна формуле (1), в которой $k = k(T_0)$, $R_0 = R(T_0)$.

$R(T)$ в виде:

$$R(T) = R + \Delta R(T), \quad (24)$$

где R_0 – сопротивление тензорезистора при $\varepsilon = 0$ и фиксированной температуре T_0 ; $\Delta R(T)$ – изменение сопротивления, обусловленное изменением температуры.

При этом, принимая во внимание, что $\varepsilon \ll 1$, $\Delta R(T) \ll R_0$, получаем

$$R(\varepsilon, T) = R + \Delta R(T) + R(k)(T)\varepsilon, \quad (25)$$

откуда вытекает, что

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta R(T)}{R} + K(T)\varepsilon. \quad (26)$$

Подставив это соотношение в формулу (17), получим

$$\varepsilon = \frac{1}{k(T)} \left(\frac{U_{\text{вых.}}}{U} - \frac{\Delta R(T)}{R} \right); \quad (27)$$

$$\Delta = \frac{1}{k(T)} \frac{\Delta R(T)}{R} + \frac{U_{\text{вых.}}}{U} \left(\frac{1}{k} - \frac{1}{k(T)} \right). \quad (28)$$

Откуда вытекает, что при изменении T погрешность измерения зависит от начального сопротивления тензорезистора, а также от изменения его коэффициента тензочувствительности с температурой. Отметим, что когда температура фиксирована $T = T_0$, то $k = k(T)$, $\Delta R(T) = 0$, в результате чего $\Delta = 0$.

Если коэффициент тензочувствительности мало изменяется при изменении температуры $k(T) \approx k$, то формула (28) приобретает вид:

$$\Delta = \frac{1}{k} \frac{\Delta R(T)}{R_\varepsilon}. \quad (29)$$

Погрешность в таком случае определяется только температурным коэффициентом первоначального сопротивления тензорезистора.

Рассмотрим устранение погрешности, обусловленной изменениями температуры. С этой целью рассмотрим тензорезистор с базой, которая вдвое длиннее базы обычного тензорезистора (рис. 4) (или используем другой аналогичный тензорезистор, который находится в тех же температурных условиях и не подклеен или подклеен частично). Его особенность заключается в том, что он установлен на поверхности объекта путем приклеивания только одной половины длины его базы. Приклеенная часть деформируется совместно с объектом и меняет свое сопротивление с изменением температуры:

$$R_\varepsilon = R(\varepsilon, T), \quad (30)$$

а сопротивление R_n неподклеенной части (либо другого, неподклеенного тензорезистора) зависит только от температуры:

$$R_n = R(T). \quad (31)$$

При подключении подклеенной и неподклеенной частей тензорезистора в смежные части мостовой схемы выходное напряжение будет определяться, как и в предыдущем случае, по формулами (11)–(12). Примем дополнительно, что длины подклеенной и неподклеенной частей равны между собой, поэтому и начальные сопротивления этих частей одинаковы. Сопротивление подклеенной части резистора будет изменяться согласно формуле (26), а сопротивление неподклеенной части запишем в виде:

$$R_n = R + \Delta R(T). \quad (32)$$

Подставив соотношения (26) и (32) в формулу (12), получим:

$$U_{\text{вых.}} = U \frac{Rk(T)\varepsilon}{(R_1 + R_2)(R_\varepsilon + R_3)}. \quad (33)$$

При выполнении условий $R_3 = R_2 \ll R$

$$U_{\text{вых.}} = Uk(T)\varepsilon. \quad (34)$$

Отсюда вытекает, что выходной сигнал не содержит составляющей, которая обусловлена изменением первоначального сопротивления тензорезистора при изменении температуры окружающей среды.

В нашем случае $R_1 = R_3 = R$, а $R_2 = R_4 = R + \Delta R$. Учитывая, что $\Delta R \ll R_0$, получим соответственно: при питании от источника напряжения:

$$U_{\text{вых.}} = U \frac{\Delta R}{2R} = \frac{U}{2} \xi, \quad (35)$$

при питании от источника тока:

$$U_{\text{вых.}} = I \frac{\Delta R}{2} = \frac{U}{2} \xi. \quad (36)$$

При проведении измерений используем мостовую схему с включением тензодатчиков в четыре плеча (см. рис. 3), в которой при использовании четырех датчиков два тензорезистора будут измерительными (R_2 и R_4) и два компенсирующими (R_1 и R_3).

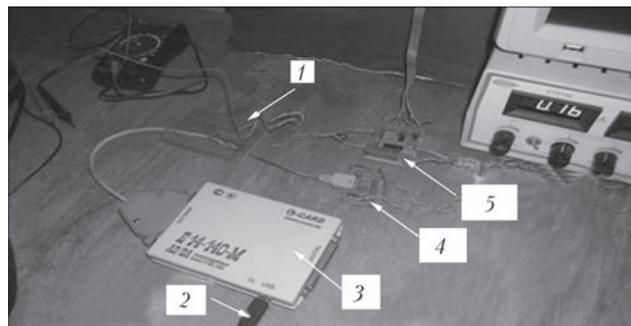


Рис. 4. Устройство для сбора и передачи данных сигнала тензометрических и температурных датчиков: 1 – плата сбора данных; 2 – USB-разъем к компьютеру; 3 – АЦП; 4 – мост термпары; 5 – плата согласования

Измеренную деформацию переводим в напряжение по формуле

$$\sigma_{\varepsilon} = \varepsilon \frac{\nu E + (1 - 2\nu) E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}.$$

Таким образом, получены значения деформаций и напряжений при конкретной температуре и нагрузке.

Результаты исследований и их анализ. Измерение температурных деформаций осуществлялось на металлической двутавровой балке профиля № 14, длина балки 2,25 м. Измерение деформаций проводилось с помощью мостовой тензометрической схемы (рис. 4), а измерение температуры – с помощью датчика температуры, который также включался по мостовой схеме.

Оба аналоговых сигнала поступают на входы каналов АЦП, где они преобразуются в цифровой код и далее передаются на компьютер.

Компьютер накапливает полученную информацию в форме баз данных. Эту базу данных в дальнейшем обрабатываем и анализируем.

Ход проведения измерений

1. После наклеивания тензодатчиков, монтажа схемы и оборудования устанавливаем показания микрометра на нуль. Далее фиксируем напряжение на выходе тензометрического моста, которое составляет 0,0027 В.

2. С помощью пирометра измеряем температуру балки, которая составляет 16,5 °С. Фиксируем напряжение на выходе моста с датчиком температуры, которая составляет 0,250 В.

3. С целью калибровки датчиков нагреваем балку до температуры 40 °С, контролируя ее с помощью пирометра. Фиксируем напряжения на выходах мостов, составляющие на выходе тензометрического моста – 0,0112 В, а на выходе моста с датчиком температуры – 0,300 В (напряжения контролируются с помощью программного обеспечения L-Graph 2 и осциллографа). Фиксируем деформацию балки с помощью микрометра, которая составляет 0,065 мм.

4. Даем балке остыть до начальной температуры.

5. Постепенно нагревая балку, постоянно снимаем показания с измерительных мостов. Полученные значения деформации и температуры отображаются в виде графиков на экране монитора и сохраняются на жестком диске с целью дальнейшей обработки.

На рис. 5 в качестве примера приведены снимки экрана для неоткалиброванных значений температуры 10 и 40 °С соответственно. Как видно, происходит постепенный рост температуры (нижняя линия на графиках) и деформаций (верхняя). По оси абсцисс на графиках (рис. 5) отложены отметки времени, а по оси ординат – амплитуда сигнала на входе преобразователя.

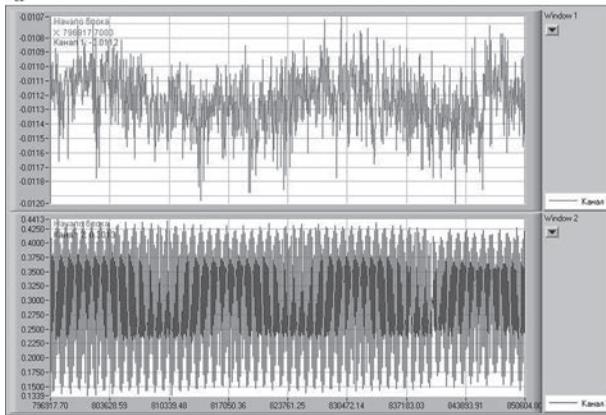
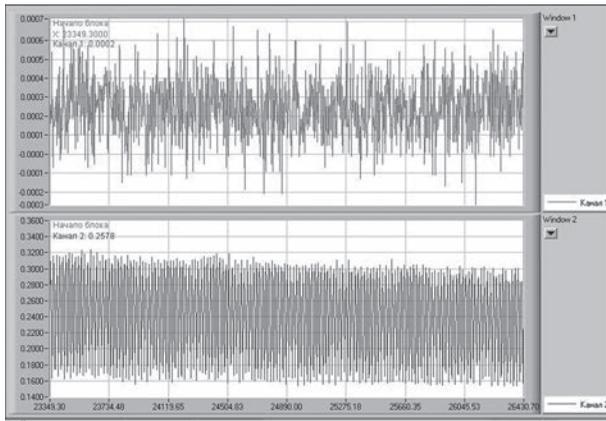


Рис. 5. Окна программы в процессе измерений при температуре 10 (а) и 40 °С (б)

Результаты экспериментальных измерений температурных деформаций металлической двугавровой балки

Номер п/п	Температура t , °С	Эксперимент ϵ , мм
1	15	0,030
2	20	0,034
3	25	0,039
4	30	0,049
5	35	0,052
6	40	0,065

6. Дальнейшую обработку информации проводили для точек с температурами: 15, 20, 25, 30, 35, 40 °С. При этом учитывались данные, полученные при калибровке.

Результаты измерений температурных деформаций приведены в таблице.

Выводы

Разработанное устройство по измерению характеристик НДС транспортных сооружений при переменных температурах и нагрузках можно применять для непрерывного НК их технического состояния.

Для создания системы мониторинга НДС этих конструкций целесообразно использовать тензодатчики в качестве измерительных преобразователей деформации. По результатам такого мониторинга можно прогнозировать деформации элементов транспортных сооружений при различ-

ных температурных условиях, которые необходимо учитывать на этапе их проектирования.

1. Ковальчук В.В. Стан та проблеми забезпечення довговічності прогонових будов мостів // 36. наук. праць ДонІЗТ. – 2012. – № 32. – С. 226–235.
2. Коваль П.М., Балабух Я.А. Проблеми забезпечення довговічності сталезалізобетонних мостів // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій. – Львів: Каменяр, 2012. – Вип. 9. – С. 426–443.
3. Лучко Й.Й., Ковальчук В.В. Вимірювання напружено-деформованого стану конструкцій мостів при змінних температурах і навантаженнях. – Львів: Каменяр, 2012. – 235 с.
4. Zeit по темі «Розробити рекомендації із вимірювання характеристик напружено-деформованого стану елементів мостів при змінних температурах». – Київ: ДерждорНДІ, 2007. – 62 с.
5. Лучко Й.Й., Ковальчук В.В. Деякі аспекти діагностики довговічності та надійності залізобетонних мостових споруд // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій. – 2012. – Вип. 9. – С. 451–456.
6. Кваща В.Г. Обстеження та випробування автомобільних мостів. – Львів: Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2002. – 104 с.
7. Лучко Й.Й. Методика вимірювання напружено-деформованого стану елементів конструкцій під час змінних температур і навантажень // Сб. научн. тр. Днепропетр. ПГА-СА: Строительство, материаловедение, машиностроение. – 2008. – Вып. 47. – С. 382–387.
8. Kester Walt. Practical desing techniques for sensor signal conditioning. – Canada, 1999. – 366 p.
9. Ковальчук В.В., Лучко Й.Й. Багатофункціональні датчики / Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2011. – Вип. 39. – С. 72–82.
10. Лучко Й.Й. Принцип роботи давачів та схеми вимірювання напружено-деформованого стану в елементах мостових конструкцій під час змінних температур / Ресурсоєкономні матеріали, конструкції, будівлі і споруди. – 2008. – Вип. 17. – С. 347–358.
11. Пат. № 93604 МПК G 01 B 5/30, E04B 1/00. Пристрій для вимірювання та оцінки напружено-деформованого стану транспортних споруд при змінних температурах і статичних та динамічних навантаженнях / В.В. Ковальчук; Заявник В.В. Ковальчук. – № u2014 04271; Заяв. 22. 04. 2014 р.; Опубл. 10.10.2014; Бюл. № 19.
12. Пат. № 94540 МПК G 01 B 5/30. Спосіб визначення напружень у мостових конструкціях та металевих гофрованих трубах, які виникають внаслідок дії змінних температур та навантажень / Й.Й. Лучко, О.М. Возняк, В.В. Ковальчук; № u2014 01808; Заяв. 24. 02. 2014 р.; Опубл. 25.11.14; Бюл. № 22.
13. Hoffmann K. An Introduction to Measurements sing Strain Gages. – Darmstadt: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, 1989. – 273 p.
14. Немец И. Практическое применение тензорезисторов. – М.: Энергия, 1970. – 144 с.
15. Ковальчук В.В. Пристрої для досліджень давачів вимірювання деформацій / Ресурсоєкономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – 2011. – Вип. 21. – С. 232–237.
16. Пат. 87550 МПК G 01 B 5/30. Пристрій для вимірювання та оцінки напружено-деформованого стану мостових конструкцій при змінних температурах і навантаженнях (ВНДСМК) / Й.Й. Лучко, О.М. Возняк, В.В. Ковальчук; № u2013 10779; Заяв. 09.09.2013 р.; Опубл. 10.02.14; Бюл. № 3.
17. Дмитрієв М.М. Неруйнівний контроль стану аеродромних покриттів тепловими методами // Вісник Нац. трансп. ун-ту України. – 2002. – № 6. – С. 171–181.
18. Дмитрієв Н.Н. Основы контроля и диагностики аэродромных покрытий. – Киев: УТУ, 1998. – 240 с.
19. Стороженко В.А., Вавилов В.П., Волчек А.Д. Неразрушающий контроль качества промышленной продукции активным тепловым методом. – Киев: Техніка, 1988. – 125 с.



20. Олійник А.П., Незамай Б.С., Кучер О.Р. Моделирование процессу деформування в задачах контролю технічного стану промислових споруд // Методи та прилади контролю якості. – 2011. – № 27. – С. 1–5.
21. Жуков Б.Н. Руководство по геодезическому контролю сооружений и оборудования промышленных предприятий при их эксплуатации. – Новосибирск: СГГА, 2004. – 376 с.
22. Жуков Б.Н. Геодезический контроль сооружений и оборудования промышленных предприятий. – Новосибирск: СГГА, 2003. – 356 с.
23. Михелев Д.Ш., Рунов И.В., Голубцов А.И. Геодезические измерения при изучении деформаций крупных инженерных сооружений. – М.: Недра, 1977. – 184 с.
24. СНиП 2.01.07–85. Нагрузки и воздействия. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986 – 36с.
25. Макаров Р.А., Басин Я.Н. Радиоизотопные методы измерений в строительстве. Обзор методов и приборов, основанных на использовании гамма-излучения. – М.: Машиностроение, 1963. – 180 с.
26. Клюев В.В. Неразрушающий контроль. – Т. 3.: Справочник. В 7 кн. / Под ред. В.В. Клюева. – М. Машиностроение, 2004. – 511с.
27. Гучкин И.С. Диагностика повреждений и восстановление эксплуатационных качеств конструкций. – М.: Издво Ассоциации строительных вузов, 2001. – 176 с.
28. Бойко М.Д. Диагностика повреждений и методы восстановления эксплуатационных качеств зданий. – Л.: Стройиздат, 1975. – 334 с.
29. Кравцов А.В., Рыбинский Ю.В. Электрические измерения. – М.: Колос, 1979. – 351 с.

Scientific bases for a new device for measurement and evaluation of stress-strain state of transport facilities at variables temperatures and loads have been developed. Technical problem, which is solved by this work, consists in taking scientifically-grounded decisions by the results of transport facilities monitoring, on the need to conduct reconditioning repair, monitoring the gradual lowering of load-carrying capacity of structural elements, determining their actual technical condition and residual life. 29 References, 1 Table, 5 Figures.

Keywords : device for stress-strain state measurement, loads, transport facilities, load-carrying capacity

Поступила в редакцию
12.10.2015

Национальная академия наук Украины
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины
Международная Ассоциация «Сварка»

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ

13–15 июня 2016 г., Киев

ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины

Тематика конференции

- Электронно-лучевая сварка;
- Лазерная сварка;
- Гибридные процессы сварки;
- STIR;
- Контактно-стыковая сварка высокопрочных сталей;
- Сварка дугой, вращающейся в магнитном поле;
- 3D аддитивные технологии, базирующиеся на сварочных процессах;
- Методы НК и диагностики сварных конструкций.



Выставка

Во время работы конференции в корпусе №4 ИЭС будет работать выставка «Сварка и родственные технологии». Время работы выставки – 14.06.2016 г. с 9.00 до 17.00, 15.06.2016 г. – с 9.00 до 16.00.

Секретариат конференции

Зельниченко Александр Тимофеевич
тел./факс: (38044) 200-82-77, 200-81-45
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.pwi-scientists.com/rus/modernweld2016

ОЦЕНКА ГРАНИЧНОЙ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ ГЕРМОПРОХОДОК ЭНЕРГОБЛОКА № 2 РОВЕНСКОЙ АЭС

В.М. ТОРОП, А.А. ПЕРЕПИЧАЙ

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

Рассмотрены основные подходы, используемые для определения граничной сейсмостойкости гермопроходок энергоблока № 2 Ровенской АЭС. Проведен анализ результатов консервативного и уточненного методов расчета граничной сейсмостойкости, а также границы применимости рассмотренных подходов. Библиогр. 5, табл. 2, рис. 6.

Ключевые слова: граничная сейсмостойкость, оценка работоспособности трубопроводных систем, элементы оборудования АЭС, границы применимости подходов, коэффициент запаса

Работы, связанные с выполнением оценки работоспособности трубопроводных систем и элементов оборудования АЭС сопряжены с рядом трудностей. Одной из них является та, что далеко не всегда имеется вся проектная, а также эксплуатационно-техническая документация. Выходом с этой ситуации является составление чертежей элементов оборудования «по месту» во время планово-производственного ремонта (ППР). Но описанный подход не удается применить для неразборных элементов, которые скрыты под «внешним слоем» оборудования.

Именно с такой ситуацией пришлось столкнуться во время проведения работ по оценке граничной сейсмостойкости (НCLPF) гермопроходок энергоблока № 2 Ровенской АЭС в связи с конструктивными особенностями гермопроходок (рис. 1) и отсутствием проектно-конструкторской документации на большинство из них.

Для решения поставленной задачи было решено принять, что формой отказа при сейсмическом воздействии для гермопроходки является нарушение герметичности гермообъема (ГО). При разрушении сварных швов трубопроводов герме-

тичность ГО не нарушается, так как на них установлена локализирующая арматура. Учитывая сказанное выше, оценка граничной сейсмостойкости герметичных проходок проводится по наиболее слабому элементу конструкции проходки, а именно сварному шву стыковки проходки с закладными элементами (рис.2).

Целью данной работы является сравнение нескольких упрощенных консервативных подходов к расчету граничной сейсмостойкости с уточненной методикой. Все рассмотренные подходы к определению НCLPF выполнены в соответствии с требованиями ПНАЭ [1] и учетом рекомендаций МАГАТЭ [2].

В соответствии с приведенными выше документами анализ сейсмостойкости оборудования и трубопроводов проводится методом граничной сейсмостойкости. Для вычисления величины граничной сейсмостойкости используется коэффициент запаса, который определяется соотношением:

$$FS = \frac{C - D_{NS}}{\left((D_S^2 + D_{SAM}^2)^{\frac{1}{2}} + \delta C_S \right)}, \quad (1)$$

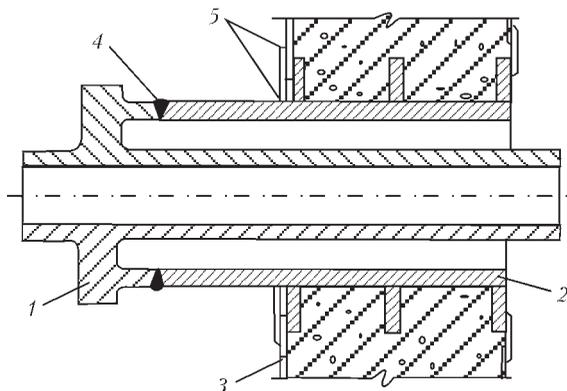


Рис. 1. Схема гермопроходки: 1 – корпус проходки; 2 – закладная труба; 3 – герметичная облицовка; 4 – контролируемый шов; 5 – сварные швы

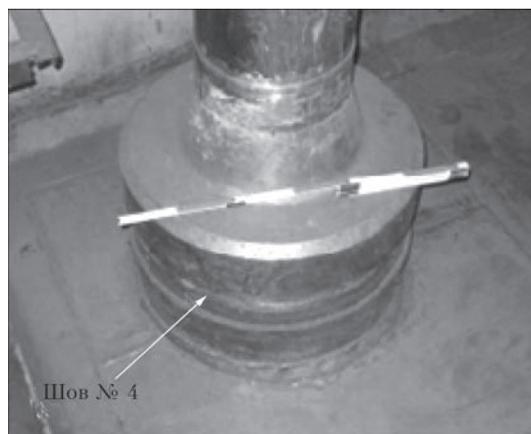


Рис. 2. Фото гермопроходки со стороны реакторного зала (шов № 4 – стыковка проходки с закладными элементами)

где FS – коэффициент запаса; C – значение допускаемого параметра (например, допускаемые напряжения); D_{NS} – вклад в оцениваемый параметр всех несейсмических нагрузок, входящих в предписанную комбинацию нагрузок; D_S – вклад в оцениваемый параметр только сейсмических инерционных нагрузок; D_{SAM} – вклад в оцениваемый параметр нагрузок от сейсмического смещения опор; δC_S – снижение величины допускаемого параметра из-за действия сейсмической нагрузки.

Величина граничной сейсмостойкости определяется следующим соотношением (2):

$$HCLPF = FS F_{\mu} ZPA, \quad (2)$$

где HCLPF – величина граничной сейсмостойкости; F_{μ} – коэффициент неупругого поглощения энергии; $ZPA = 0,1g$ – ускорение нулевого периода (пиковое ускорение).

Расчеты гермопроходок выполнены с помощью программных комплексов ANSYS и АСТРА–АЭС.

Возможность использования «консервативного» подхода при оценке граничной сейсмостойкости сварного шва стыковки проходки с закладными элементами рассмотрен на примере локализирующего барьера 2ГПТСаОЗНД1С2. Указанная гермопроходка была выбрана в связи с тем, что имела полный комплект проектно-технической документации. Рабочие параметры проходки $T = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и $P_{\text{внутр}} = 14 \text{ МПа}$.

Суть первого «консервативного» подхода заключается в определении усилий и моментов при нормальных условиях эксплуатации (НУЭ) и максимальном расчетном землетрясении (МРЗ) с помощью АСТРА–АЭС в центральной точке сечения трубы без моделирования «тела» проходки (рис. 3). Полученные расчетные значения усилий и моментов прикладываются к внешней части гермопроходки и представлены на рис. 3.

Суть «консервативного» подхода №2 заключается также в определении усилий и моментов при

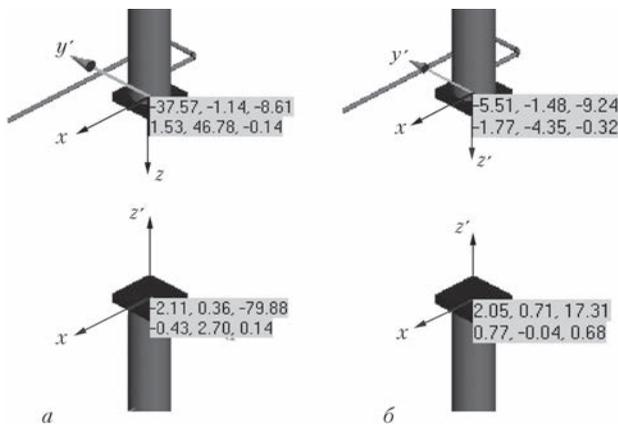


Рис. 3. Результаты расчетов сил (первый ряд) и моментов (второй ряд) в узлах примыкания гермопроходки 2ГПТСаОЗНД1С2 к трубопроводам в локальной системе координат: а – НУЭ; б – МРЗ

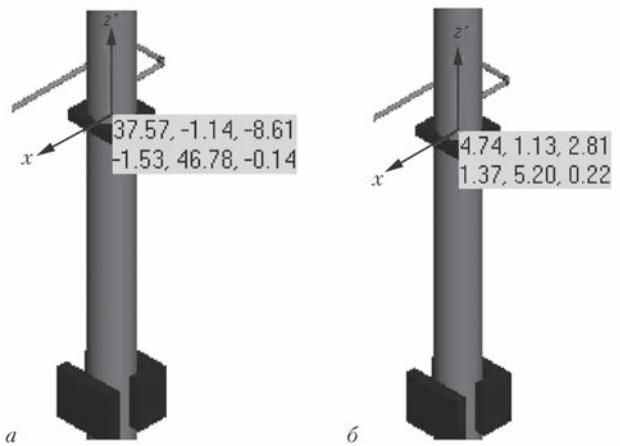


Рис. 4. Результаты расчетов сил (первый ряд) и моментов (второй ряд) в узлах примыкания гермопроходки 2ГПТСаОЗНД1С2 к трубопроводам в локальной системе координат: а – НУЭ; б – МРЗ

НУЭ и МРЗ в центральной точке сечения трубы, но уже с «телом» проходки (рис. 4).

Ниже приведены известные соотношения (3) – (5) для определения напряжений в сварном шве приварки трубы гермопроходки к закладным деталям [3]:

$$\sigma = \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\pi r^3} + \frac{N_z}{F}, \quad (3)$$

$$\tau = \frac{M_z}{\pi r^3} + \frac{4}{3} \frac{\sqrt{P_x^2 + P_y^2}}{F}, \quad (4)$$

$$\sigma_{\text{экр}} = \sqrt{(\sigma)^2 + 4(\tau)^2}, \quad (5)$$

где σ – нормальные напряжения, МПа; τ – касательные напряжения, МПа; $\sigma_{\text{экр}}$ – эквивалентные напряжения, МПа; P_x, P_y, N_z – усилия, кН; M_x, M_y, M_z – моменты, кН·м; r – радиус трубы в месте приварки проходки к закладным деталям, м; F – площадь поперечного сечения трубы в месте приварки проходки к закладным деталям, м².

В табл. 1 приведены результаты расчета напряжений для сварного шва приварки трубы гермопроходки к закладным деталям при использовании «консервативного» подходов № 1 и 2.

Полученные в результате расчетов в АСТРА–АЭС усилия и моменты в узлах примыкания трубопроводов к гермопроходке при НУЭ, а также при МРЗ используются далее в качестве граничных условий при «уточненном» моделировании гермопроходки методом конечных элементов.

Таблица 1. Сравнение результатов расчета напряжений при использовании «консервативного» подходов № 1 и 2

Номер подхода	НУЭ, МПа	НУЭ+МРЗ, МПа	HCLPF
1	119,5	122,3	1,97
2	119,5	122,1	1,93

Использование метода конечных элементов позволяет с высокой точностью определить напряжения в элементах оборудования в результате сейсмического воздействия. В настоящее время наиболее распространенным и универсальным программным пакетом, использующим конечно-элементный анализ, является программный комплекс (ПК) ANSYS [4].

ПК ANSYS – наиболее универсальная программная система конечно-элементного анализа. Она является довольно популярной у специалистов в сфере автоматизированных инженерных расчетов (CAE, Computer-Aided Engineering). Пакет позволяет решать задачи из множества областей науки и техники: решения линейных и нелинейных, стационарных и нестационарных пространственных задач механики деформируемого твердого тела и механики конструкций, задач механики жидкости и газа, теплопередачи и теплообмена, электродинамики, акустики, а также механики связанных полей. Моделирование и анализ в некоторых областях промышленности позволяет избежать дорогостоящих и длительных циклов разработки типа «проектирование – изготовление – испытания».

Используемые в ПК ANSYS инструменты численного моделирования и анализа удобны для пользователя, совместимы с другими пакетами, работают на различных платформах и позволяют решать связанные задачи механики и физики [5].

На рис. 5 изображены расчетная (геометрическая) модель локализационного барьера 2ГПТСаОЗНД1С2, а также конечно-элементная модель, разработанные в препроцессоре ANSYS.

Расчет граничной сейсмостойкости проводился в четыре этапа:

- расчет напряжений, возникающих в результате воздействия статических нагрузок при НУЭ;
- проведение модального анализа – расчет форм и частот собственных (резонансных) колебаний конструкции с использованием результатов предыдущего анализа в качестве преднапряженного состояния конструкции;



Рис. 5. Расчетная (геометрическая) модель локализационного барьера 2ГПТСаОЗНД1С2 (а) и конечно-элементная модель 2ГПТСаОЗНД1С2 (б)

- расчет напряжений, возникающих от воздействия сейсмических нагрузок в виде спектров отклика, соответствующих 7 баллам МРЗ;
- расчет напряжений от совместного воздействия статических нагрузок от НУЭ и МРЗ, а также расчет HCLPF.

Полученные в результате расчета распределения эквивалентных напряжений в гермопроходке 2ГПТСаОЗНД1С2 с учетом приведенных на рис. 3 комбинации нагрузок при НУЭ и при НУЭ+МРЗ показаны на рис. 6 и 7 соответственно.

Эквивалентные напряжения в сечении примыкания трубопроводов к гермопроходке 2ГПТСаОЗНД1С2 с приложенными максимальными значениями нагрузок при НУЭ и моделировании гермопроходки в качестве жесткой заделки равны 75,8 МПа, что близко к полученным нами значениям 119,5 МПа при «консервативном» подходе. Максимальные напряжения в 124,5 МПа в данном случае возникают в так называемой точке сингулярности в месте приложения граничных условий и не являются показательными.

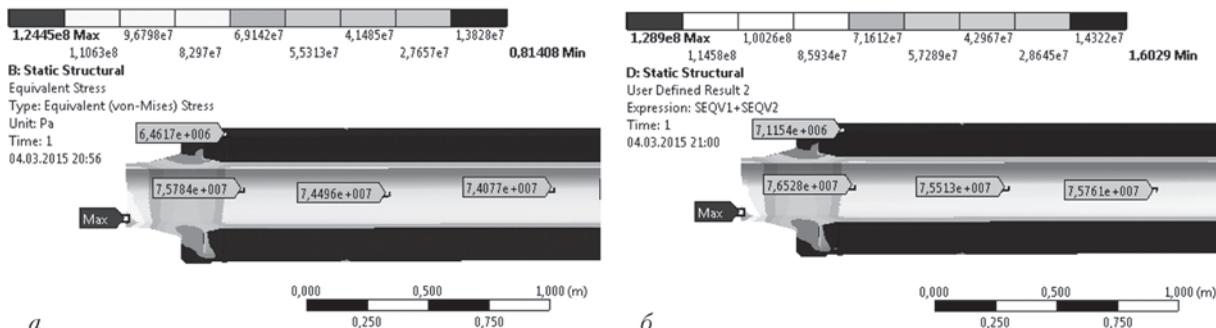


Рис. 6. Результаты расчета на статическую прочность при НУЭ (а) и НУЭ+МРЗ (б)



Таблица 2. Сравнения результатов расчета напряжений при использовании «консервативного» подходов № 1 и 2 и «уточненного»

Подход	НУЭ, МПа	НУЭ+МРЗ, МПа	HCLPF
№1	119,5	122,3	1,97
№2	119,5	122,1	1,93
ANSYS	75,8	76,52	2,03

Сопоставление результатов расчетов по консервативному подходу № 1 и 2 (с помощью ПК АСТРА–АЭС) и уточненному (с помощью ПК АСТРА–АЭС и ПК ANSYS) подходам приведены в табл. 2.

Из данных, представленных в табл. 2, следует, что консервативный подход № 1 и 2 дает более высокие значения приведенных максимальных эквивалентных напряжений как при НУЭ, так и при сочетании нагрузок НУЭ+МРЗ.

Выводы

Выполнена оценка граничной сейсмостойкости гермопроходки с помощью консервативного и уточненного подходов. При этом для гермо-

проходки 2ГПТСаОЗНД1С критерии прочности [1] удовлетворяются как для консервативного, так и для уточненного подходов. Консервативный подход дает более высокие значения приведенных максимальных эквивалентных напряжений и в случае неперевышения допустимых напряжений и отсутствии достоверной информации о конструктивных особенностях гермопроходки он обоснованно может быть использован при оценке сейсмостойкости гермопроходки в составе локализирующего барьера и примыкающих трубопроводов.

1. ПНАЭ Г-7-002–86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок.
2. *Evaluation of Seismic Safety for Existing Nuclear Installation Safety Standards Series № NS-G-2.13*, IAEA, Vienna, 2009.
3. Яковлев Г. С., Матвеев А. П., Писаренко В. В. Справочник по сопротивлению материалов / Отв. ред. Г.С. Писаренко. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Наук. думка, 1988. – 736 с.
4. Басов К. А. ANSYS для конструкторов. – М.: ДМК Пресс, 2009. – 248 с.
5. Басов К. А. ANSYS и LMS Virtual Lab. Геометрическое моделирование. – М.: ДМК Пресс, 2006. – 240 с.

The main approaches are considered, which are used to determine seismic stability boundary of sealed passages in power generating unit #2 of Rovno NPS. Analysis was performed of the conservative and refined method of calculation of seismic stability boundary, as well as the limit of applicability of the considered approaches. 5 References, 2 Tables, 6 Figures.

Keywords: seismic stability boundary, evaluation of piping system performance, NPS equipment components, limits of applicability of the approaches, safety factor

Поступила в редакцию
20.06.2015



NDT Systems & Services Ukraine

Международный сертификат за 2014 год «Экспортер Року»



Установка НКЗ80ВЛ

для автоматизированного ультразвукового контроля тела трубы
диаметром 146-426 мм толщиной стенки 6-40 мм

УСТАНОВКА ОБЕСПЕЧИВАЕТ

- обнаружение расслоений
- измерение толщины стенки трубы
- обнаружение дефектов различной ориентации относительно оси трубы

УНИКАЛЬНАЯ УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ НА ФАЗИРОВАННЫХ РЕШЕТКАХ

**ОДНОВРЕМЕННЫЙ КОНТРОЛЬ НАЛИЧИЯ ДЕФЕКТОВ РАЗЛИЧНОЙ
ОРИЕНТАЦИИ (17 НАПРАВЛЕНИЙ)**

**ОДНОВРЕМЕННЫЙ КОНТРОЛЬ ТОЛЩИНЫ СТЕНКИ И РАССЛОЕНИЯ ПО
ЭХО-ИМПУЛЬСНОМУ И ЭХО-ТЕНЕВОМУ МЕТОДАМ**

**ТРИ ОДИНАКОВЫЕ НЕЗАВИСИМЫЕ КАРЕТКИ ПОЗВОЛЯЮТ ПРОИЗВОДИТЬ
КОНТРОЛЬ ТРУБ РАЗЛИЧНЫХ ДЛИН С МАКСИМАЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ**

Украина, 03151, Киев, пр-т Воздухофлотский, 94 а
Тел./факс: +38(044) 249-00-94, +38(044) 383-19-81
www.ndt-global.com.ua, E-mail: office@ndt-paton.com.ua



ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СЕЛЕНИДА ЦИНКА ДЛЯ ЦИФРОВОЙ РАДИОГРАФИИ

Е.Ф. ВОРОНКИН¹, С.Р. МИХАЙЛОВ²

¹Ин-т сцинтилляц. материалов, НТК «Институт монокристаллов» НАН Украины. 61001, Харьков, пр-т Ленина, 60.

E-mail: voronkin@isma.kharkov.ua

²НТУУ «Киевский политехнический институт». 03056, пр-т Победы, 37. E-mail: fel@kpi.ua

Показана возможность применения сцинтилляционных многоэлементных сборок на основе селенида цинка, легированного алюминием ZnSe:Al, для цифровой радиографии. Предложена технология изготовления сцинтилляционных многоэлементных сборок и методика измерения взаимовлияния пикселей в сборках. Приведены результаты испытаний изготовленных многоэлементных сборок на основе ZnSe:Al в составе компьютерного томографа. Библиогр. 6, табл. 1, рис. 3.

Ключевые слова: цифровая радиография, флэш-радиография, неразрушающий контроль, сцинтиллятор, сцинтилляционная многоэлементная сборка

В настоящее время цифровая радиография (ЦР) (флэш-радиография) является одним из наиболее распространенных и перспективных методов радиационного неразрушающего контроля (НК) [1]. При цифровой радиографии ионизирующее излучение, прошедшее через контролируемый объект, с помощью электронных средств преобразуется в массив электрических сигналов, которые оцифровываются, обрабатываются с помощью компьютерной техники и используются для формирования цифрового изображения контролируемого объекта. Цифровое изображение объекта содержит информацию о его внутренней структуре и может формироваться непосредственно во время просвечивания, т. е. в реальном времени [2].

По сравнению с традиционной пленочной радиографией ЦР, наряду с возможностью получения изображения в реальном времени имеет также следующие преимущества:

- более эффективная регистрация ионизирующего излучения в широком энергетическом диапазоне (30 кэВ...10 МэВ);
- возможность компьютерной обработки и анализа цифровых изображений;
- возможность создания электронных архивов цифровых изображений, документирования изображений и их передачи на значительные расстояния с использованием компьютерных сетей;
- значительное повышение производительности контроля за счет исключения технологических операций обработки промежуточных носителей информации (пленок, пластин и т. п.);
- снижение стоимости контроля;
- снижение лучевой нагрузки на контролируемый объект.

Перечисленные преимущества ЦР предопределили ее применение в таких областях, как техническая диагностика и НК, инспекционные си-

стемы, компьютерная томография, медицинская рентгенодиагностика.

В настоящее время в ЦР наиболее распространены детектирующие системы непрямого преобразования. В таких системах теневое радиационное изображение с помощью сцинтилляторов (сцинтилляционных экранов) преобразуется в начале в световое, которое затем преобразуется в электрический сигнал. Далее электрический сигнал оцифровывается и используется для формирования выходного изображения внутренней структуры объекта. К таким детектирующим системам относятся системы на основе рентгеновских электронно-оптических преобразователей (РЭОП), системы типа «сцинтиллятор–оптика–ПЗС», а также системы на основе плоскопанельных матричных и линейных детекторов «сцинтиллятор–полупроводник» [2].

В таких детектирующих системах одним из основных звеньев в процессе преобразования теневого радиационного изображения в электрический сигнал является сцинтиллятор (сцинтилляционный экран), параметры которого в значительной степени определяют качество изображений, получаемых с помощью цифровой радиографической системы. Исходя из этого можно заключить, что визуализация внутренней структуры объектов с помощью сцинтилляционных детекторов является важной задачей.

Целью работы является проведение сравнительного анализа традиционных и новых типов композитных сцинтилляционных экранов, исследование возможности применения сцинтилляционных матриц на основе селенида цинка, легированного алюминием ZnSe:Al, для ЦР, а также разработка технологии изготовления многоэлементных линейных (1D) и матричных (2D) сборок для визуализации излучений в системах радиационного НК и компьютерной томографии.



Сравнительная характеристика цифровых радиографических систем. В системах на основе РЭОП последний является преобразователем рентгеновского излучения в видимое и одновременно выполняет функции усилителя яркости изображений. Диаметр рабочего поля различных типов РЭОП составляет от 120 до 400 мм, а диаметр выходного экрана 20, 25, 30 или 35 мм. Входные сцинтилляционные экраны у современных РЭОП изготавливают в основном из иодида цезия CsI. Изображение, сформированное на выходном экране РЭОП, с помощью оптической системы переносят на вход фотоприемника телевизионной камеры. В качестве фотоприемника в современных телевизионных камерах применяются матрицы на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС-матрицы), а также КМОП-сенсоры. Такие системы применяются для контроля объектов в динамике с относительной чувствительностью 2...3 % и разрешающей способностью 3...5 пар лин./мм.

Недостатками систем на основе РЭОП являются высокая стоимость, большие габариты и масса, относительно небольшой размер рабочего поля, чувствительность к вибрациям и ударам.

Системы «сцинтиллятор–оптика–ПЗС» имеют ряд преимуществ перед системами на основе РЭОП: возможность смены сцинтилляционного экрана, что позволяет изменять размер рабочего поля и другие параметры системы; малое время получения изображения; простота конструкции; малые габариты и масса; низкая стоимость и др. Сцинтилляционный экран в таких системах преобразует теневого радиационного изображения контролируемого объекта в видимое. Перенос видимого изображения с экрана на фотоприемник телевизионной камеры происходит с помощью зеркально-линзовой оптической системы. Для защиты от прямого ионизирующего излучения, которое может приводить к деградации фотоприемника, телевизионная камера заключена в защитный свинцовый экран.

Параметры цифровых систем «сцинтиллятор–оптика–ПЗС» определяются параметрами каждого звена системы: сцинтилляционного экрана, оптической системы и фотоприемника.

Если система предназначена для промышленного НК, то в качестве сцинтилляционного экрана применяют монокристаллические экраны CsI:Tl или порошковые экраны $Gd_2O_2S(Tb)$, а в оптических системах применяют мегапиксельные светосильные объективы.

Из-за низкой яркости свечения сцинтилляционных экранов в телевизионных камерах таких систем необходимо применять высокочувствительные фотоприемники с высокой разрешающей способностью (мегапиксельные ПЗС-матрицы либо КМОП-сенсоры, параметры которых

практически сравнивались с параметрами ПЗС-матриц). Пригодны, например, ПЗС-матрицы с микролинзами фирмы Sony (технология EXview HAD CCD). Для повышения чувствительности и уменьшения шумов на изображении применяют режим длительного накопления изображений на фотоприемнике, а увеличение возможных длительностей накопления изображений достигается за счет охлаждения фотоприемника с помощью элементов Пельтье. С целью увеличения размера рабочего поля и разрешающей способности таких систем для считывания изображения с сцинтилляционного экрана иногда применяют несколько ПЗС-матриц (от 4 до 88) [2].

Чувствительность контроля систем «сцинтиллятор–оптика–ПЗС» соответствует чувствительности пленочной радиографии, а разрешающая способность составляет до 10 пар лин./мм.

Наиболее перспективными являются цифровые системы на основе плоскопанельных матричных и линейных детекторов «сцинтиллятор–полупроводник». В матричных плоскопанельных детекторах чаще всего используются панели на основе аморфного кремния (a-Si) в комбинации с различными сцинтилляторами (например, $Gd_2O_2S:Tb$, CsI:Tl и др.). Максимальные размеры плоскопанельных детекторов «сцинтиллятор–полупроводник» составляют 40×40 см, а разрешающая способность – до 10 пар лин./мм, что соответствует размеру пикселя 50 мкм.

Недостатками плоскопанельных матричных детекторов является их высокая стоимость и ограниченная радиационная стойкость.

Все рассмотренные выше системы не пригодны для контроля крупногабаритных объектов. Контроль таких объектов (багажа, ручной клади, посылок, контейнеров, транспортных средств и т. п.) осуществляется с помощью линейных детекторов, работающих по принципу сканирования. Такие преобразователи обычно представляют собой линейку детекторов непрямого преобразования типа сцинтиллятор–фотодиод. В сканирующих системах изображение формируется в результате просвечивания узким веерным пучком излучения контролируемого объекта, который движется с постоянной скоростью относительно детектора. Размер и пространственная разрешающая способность сканирующей линейки определяются количеством и размером входящих в нее детекторов (каналов). Их может быть 320, 512, 640, 1024, 2048 и больше. Сканирующие системы на основе линейки детекторов имеют ряд преимуществ перед рассмотренными выше системами:

– линейки детекторов могут иметь длину в несколько метров, что позволяет сканировать объекты больших размеров;



– устраняется влияние неинформативного рассеянного излучения на качество цифрового изображения;

– возможность применения мультэнергетических детекторов, что позволяет различать материалы с разным атомным номером (органику и неорганику);

– широкий динамический диапазон (больше 7000);

– возможность изготовления линеек, повторяющих специфические формы объекта.

К недостаткам сканирующих систем можно отнести высокие требования к механическим устройствам сканирования по равномерности перемещения и вибрации, длительное время сканирования объекта.

Сравнительная характеристика сцинтилляторов. Интенсивность люминесценции экрана зависит от квантового выхода сцинтиллятора, толщины поглощающего слоя и прозрачности экрана к собственному излучению. Толщину слоя сцинтиллятора необходимо выбирать такой, чтобы обеспечивалось как эффективное поглощения квантов ионизирующего излучения, так и достаточный выход светового сигнала на фотоприемник. При выборе пары сцинтиллятор–фотоприемник для достижения высокой эффективности детектирования необходимо обеспечивать соответствие спектральной характеристики излучения сцинтиллятора спектральной характеристике чувствительности фотоприемника. Мерой такого взаимного соответствия является коэффициент спектрального соответствия K_c :

$$K_c = \int_0^{\infty} I(\lambda)S(\lambda)d\lambda / \int_0^{\infty} I(\lambda)d\lambda,$$

где $I(\lambda)$ и $S(\lambda)$ – нормированные спектральные характеристики излучения сцинтиллятора и чувствительности фотоприемника соответственно.

В таблице приведены параметры традиционных и новых типов сцинтилляторов, применяе-

мых в сцинтилляционных детекторах [3–5]. Эти параметры дают представление о светимости (световыход λ_{max}), поглотительной способности рентгеновских квантов (плотность и $Z_{эфф}$), условиях светособирания (показатель преломления и коэффициент ослабления собственного излучения), радиационной стойкости и кинетике сцинтилляционного сигнала (время высвечивания и уровень послесвечения через 3 мс после прекращения облучения).

Для НК, в котором применимы большие флюэнсы высокоэнергетических рентгеновских квантов, необходимо применять такие сцинтилляторы с большим атомным номером и высокой плотностью, как $CdWO_4$, $ZnWO_4$, $Lu_2SiO_5:Ce$, $Gd_2O_2S:Tb$ (см. таблицу). Для ряда люминофоров, которые не разлагаются при плавлении ($CdWO_4$, $ZnWO_4$, $Lu_2SiO_5:Ce$), возможно получение экранов в виде кристаллов. Оксисульфидные сцинтилляторы применяются в виде монодисперсного порошка, распределенного в полимерном связующем или в виде керамики. Для сцинтилляционных веществ, приведенных в таблице, характерны высокая радиационная стойкость и удовлетворительные кинетические параметры (за исключением $Gd_2O_2S:Tb$). Для сцинтилляторов $ZnSe:Al$, $Gd_2O_2S:Tb$, $Gd_2O_2S:Pr,Ce,F$ обеспечивается удовлетворительное спектральное соответствие с кремниевыми фотоприемниками.

В связи с необходимостью контроля объектов в режиме реального времени с высокой разрешающей способностью и развитием мультэнергетических методик контроля возникли новые требования к параметрам сцинтилляторов. Это ужесточение требований к кинетике люминесценции, симбатный характер изменения световыхода с температурой, радиационная стойкость сцинтилляторов не ниже 10^6 рад. При этом энергетическая зависимость световыхода сцинтилляторов существенно зависит от толщины образца, эффективного атомного номера ($Z_{эфф}$) и прозрачности к собственному излучению.

Параметры сцинтилляторов

Параметр	CsI:Tl	CdWO ₄	ZnWO ₄	Gd ₂ O ₂ S :Pr,Ce,F	Gd ₂ O ₂ S :Tb	Lu ₂ SiO ₅ :Ce (LSO:Ce)	ZnSe:Al
Абсолютный световыход, фот./МэВ при 662 кэВ ($\cdot 10^3$)	56	20	14	35	60	30	60
Плотность, г/см ³	4,51	8,28	7,87	7,3	7,3	7,41	5,42
$Z_{эфф}$	54	66	61	62	62	66,4	33
$T_{плавления}$, °C	894	1325	1200	Разлагается	Разлагается	2150	1520
Показатель преломления	1,79	2,3	2,2	2	2	1,82	2,5
λ_{max} , нм	550	495	490	520	550	420	610
Коэффициент ослабления собственного излучения, см ⁻¹	0,05	0,03	0,05	1	0,6	0,04	0,3
Радиационная стойкость, рад	10^6	10^6	10^5	10^7	10^7	10^8	10^7
Время высвечивания, мкс	6	5	3	4	600	0,04	2
Послесвечение, % через 3 мс	20	0,1	0,2	0,1	1	0,5	0,1

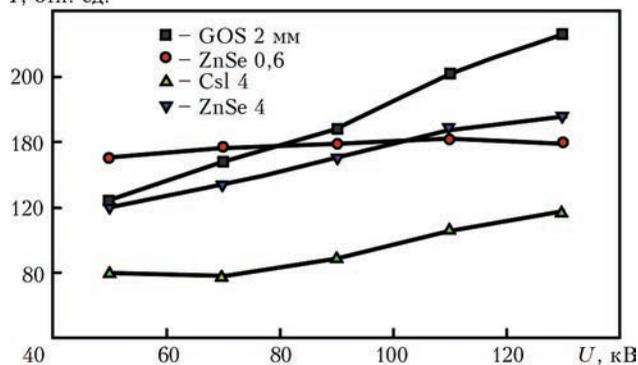
 I , отн. ед.

Рис. 1. Измеренные зависимости светового выхода керамического сцинтиллятора $Gd_2O_2S:Tb$ (GOS) и кристаллических $ZnSe:Al$, $CsI:Tl$ от анодного напряжения на рентгеновской трубке

На рис. 1 приведены измеренные зависимости световых выходов керамического сцинтиллятора $Gd_2O_2S:Tb$ (GOS) и кристаллических $ZnSe:Al$, $CsI:Tl$ от анодного напряжения рентгеновской трубки. При 50 кВ максимальный сигнал наблюдается у селенида цинка толщиной 0,6 мм. С увеличением анодного напряжения от 50 до 130 кВ световой выход этого образца практически не изменяется по причине поглощения в нем только низкоэнергетической части рентгеновского излучения. Световой выход образца селенида цинка толщиной 4 мм при увеличении анодного напряжения возрастает и превосходит световой выход тонкого образца при напряжении более 110 кВ.

Технология изготовления многоэлементных сцинтилляционных сборок. В качестве сцинтилляционного материала используем селенид цинка, легированный алюминием $ZnSe:Al$ [6]. Данный сцинтиллятор обеспечивает хорошее спектральное соответствие с фотодиодом, большой динамический диапазон (10^4), высокое быстродействие в области низких энергий рентгеновского излучения (30...50 кэВ) и высокую чувствительность детектора «сцинтиллятор–фотодиод».

Технология изготовления многоэлементных сцинтилляционных сборок заключается в порезке

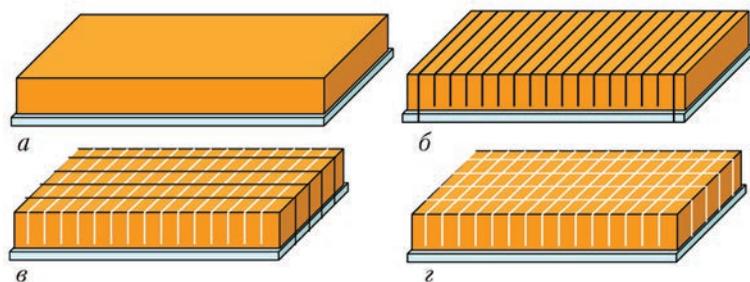


Рис. 2. Пошаговые эскизы технологии изготовления многоэлементных сцинтилляционных сборок: а – сцинтилляционная заготовка, наклеенная на подложку; б – сцинтилляционная заготовка, прорезанная на 16 каналов; в – сцинтилляционная заготовка, разрезанная на 1D-матрицы; г – 2D-матрица, изготовленная для цифровой радиографии

пластины сцинтилляционного материала нужного размера на необходимое количество элементов в двух взаимно перпендикулярных направлениях и помещение металлического отражателя между ними. В качестве отражателя применяют металлическое покрытие из серебра, индия или алюминия.

Пластину сцинтиллятора перед порезкой жестко укрепляют на подложке, которая выполняется из светоотражающей керамики или фторопласта. На рис. 2 приведены пошаговые эскизы технологии изготовления многоэлементных сборок. Технология изготовления экономична и проста, сборки получают из одной пластины, жестко укрепленной на подложке, полным ее прорезанием в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Реализация технологии не требует никакой дополнительной оснастки. После порезки не требуется полировка сторон каждого элемента, что также исключает брак при изготовлении (сколы и растрескивание). При этом обеспечиваются одинаковые геометрические размеры каждого элемента, а также равная толщина отражателя между элементами. Предлагаемая технология позволяет получать многоэлементные линейки (1D) и матрицы (2D) с минимальными размерами единичного элемента 1×1 мм. Исходя из этого, сцинтилляционные многоэлементные сборки, изготовленные по данной технологии, имеют более высокую пространственную разрешающую способность.

Рассмотрим более подробно предложенную технологию на примере изготовления матрицы из $ZnSe:Al$, состоящей из 3136 пикселей. Размер единичного пикселя равен $1 \times 1 \times 0,6$ мм, ширина светоотражающего канала 0,3 мм. Подготовленную пластину-заготовку $ZnSe:Al$ произвольного размера толщиной 0,6 мм приклеивали на керамическую светоотражающую подложку. Заготовку закрепляли на станке с алмазной пилой с внешней режущей кромкой. Прорезали первый базовый рез таким образом, чтобы пила разрежала заготовку и светоотражающую подложку. Далее прорезаем 55 резов с шагом 1,3 мм. Прорезаем пластину-заготовку на глубину 0,6 мм до светоотражающей керамической подложки. Делаем последний рез, как и базовый, с шагом 1,3 мм. Разрезанную заготовку поворачиваем на 90° и прорезаем 56 каналов аналогично сказанному выше. Разрезанную в двух взаимно перпендикулярных направлениях заготовку снимают со станка и промывают в ультразвуковой ванне для того, чтобы удалить с боковой поверхности кристалла образовавшуюся в процессе резки стружку. Далее на боковые поверхности каналов наносят светоотражающий металлический слой. Затем заполняют каналы ма-

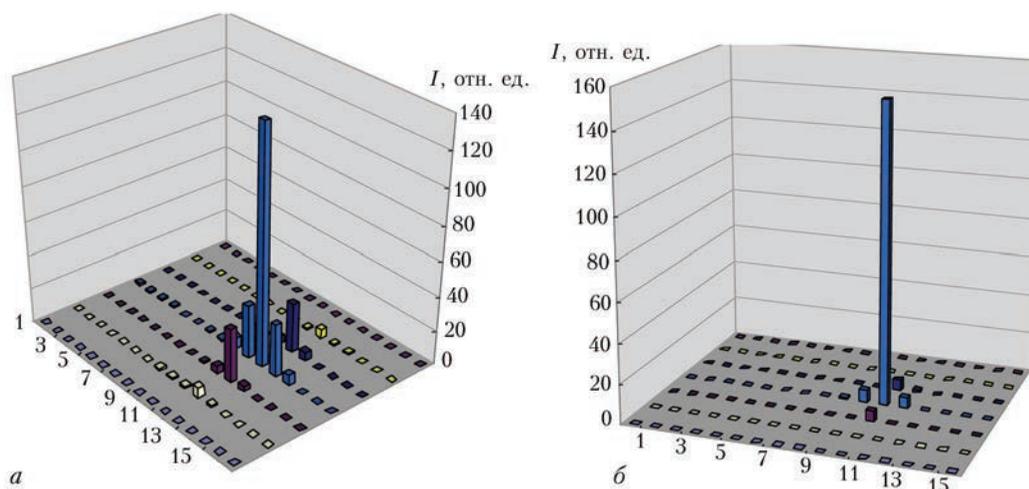


Рис. 3. Трехмерная гистограмма взаимовлияния пикселей в сцинтилляционной матрице из ZnSe(Al) с порошковым светоотражателем (а) и металлическим (б)

трицы клеем для придания ей жесткости. После полимеризации клея сцинтилляционная матрица готова.

На рис. 3 приведены измеренные трехмерные гистограммы взаимовлияния между каналами в сцинтилляционных матрицах из ZnSe(Al) с использованием разных светоотражающих покрытий. При осаждении металлического слоя на боковые поверхности каждого пикселя сцинтилляционной матрицы взаимное влияние между пикселями уменьшается вдвое. Это приводит к увеличению световых выходов, чувствительности и пространственной разрешающей способности матриц.

Выводы

Предлагаемая технология позволяет изготавливать многоэлементные линейные (1D) и матричные (2D) сцинтилляционные сборки с высокой пространственной разрешающей способностью. Технология реализуется без применения сложной специальной оснастки, является простой, экономичной и легко воспроизводимой для серийного производства.

Испытания изготовленных 198-пиксельных сцинтилляционных матриц на основе кристал-

лов селенида цинка, легированных алюминием ZnSe:Al, в составе компьютерного томографа показали их эффективность и превосходство над другими сцинтилляторами в области малых энергий рентгеновского излучения.

Разработана методика измерения взаимовлияния пикселей многоэлементных сцинтилляционных матриц. Для существенного уменьшения взаимовлияния пикселей целесообразно применять металлические светоотражающие покрытия.

1. Троицкий В.А. Флэш-радиография // Территория NDT. – 2013. – № 4. – С. 44–50.
2. Современные системы радиационного неразрушающего контроля / В.А. Троицкий, С.Р. Михайлов, Р.О. Пастовенский и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2015. – № 1. – С. 23–35.
3. Гринев Б.В., Рыжиков В.Д., Семиноженко В.П. Сцинтилляционные детекторы и системы контроля радиации на их основе / Под. ред. В.Д. Рыжикова. – Киев: Наук. думка, 2007. – 447 с.
4. Ананьева Г.В., Горохова Е.И., Демиденко В.А. Оптические свойства керамики на основе Gd_2O_3 // Оптический журнал. – 2005. – № 72 (1). – С. 68–72.
5. Nikl M. Meas. Sci. Technol. – 2006. – 17. – P. 37.
6. Пат. № 92286 Украина от 29.10.2009. Полупроводниковый сцинтилляционный материал на основе легированного ZnSe и способы его получения / Е.Ф. Воронкин, С.Н. Галкин, В.Д. Рыжиков и др.

Possibility of applying scintillation multielement assemblies based on aluminium-alloyed zinc selenide ZnSe:Al for digital radiography is shown. Technology of manufacturing scintillation multi-element assemblies and procedure of measurement of pixel interference in the assemblies are proposed. Results of testing the manufactured multielement assemblies based on ZnSe:Al in a computerized tomographic scanner are given.

Keywords: digital radiography, flash-radiography, nondestructive testing, scintillator, scintillation multielement assembly

Поступила в редакцию
20.11.2015



68-я Ежегодная Ассамблея МЕЖДУНАРОДНОГО ИНСТИТУТА СВАРКИ IIW 2015

Хельсинки, Финляндия

Окруженный с трех сторон морем и известный, как «Жемчужина Балтийского моря», Хельсинки, столица Финляндии, тепло приветствовал 885 человек из разных стран со всего мира на 68-й Ежегодной Ассамблее и Международной конференции Международного института сварки (МИС) с 28 июня по 3 июля 2015 г.

Эта уже третья Ежегодная Ассамблея МИС, проведенная в Финляндии, которая была организована Сварочным обществом Финляндии (СОФ) является членом МИС с 1949 г.). 96 финских делегатов приняли участие в этом мероприятии, представляющим замечательную возможность встретиться с коллегами, внести свой вклад и поучиться у представителей международного сварочного сообщества.

Почти рекордное количество участников Ассамблеи и конференции приехало из 54 стран. Наибольшими делегациями были представлены Германия, Япония и Республика Корея. Концентрация внимания МИС на молодых специалистах была подтверждена присутствием и участием более 80 «будущих лидеров» мировой сварочной отрасли.

Специальные встречи и мероприятия во время проведения Ассамблеи включали семинар по аддитивному производству, семинар по мониторингу состояния конструкций и др.

Мониторинг технического состояния конструкций (МТСК) включает установку датчиков, или массивов датчиков на разработанной конструкции для ее периодического контроля с целью определения ее деградации под влиянием рабочей среды. Датчики обеспечивают неразрушающие измерения для получения информации о критических свойствах конструкции такой, как результаты измерения толщины стенки для обнаружения коррозии, мониторинг возникновения или роста трещин для сварных швов, подверженных растрескиванию, мониторинг вибрации конструкции, которая подвержена усталости, и измерения напряжений для конструкций, где необходимо контролировать либо пиковые нагрузки, либо результаты детального измерения напряжений. Эти данные затем анализируются статистически для определения текущего состояния конструкции, чтобы оценить ее остаточный ресурс, и чтобы

можно было принять решения для последующего технического обслуживания.

Комиссии V (Неразрушающий контроль и обеспечение качества сварных изделий), XI (Сосуды давления, котлы и трубопроводы), XIII (Усталость сварных изделий и конструкций) и XV (Проектирование, анализ и изготовление сварных конструкций) провели совместный семинар по этому важному вопросу. Многие страны и отрасли промышленности по всему миру вынуждены управлять старением инфраструктуры и изучают пути продления срока службы в рамках экономических ограничений и требований обеспечения общественной и экологической безопасности. Присутствие более 60 представителей из 17 стран продемонстрировало важность этого форума и знаний, которыми обменялись участники.

Представленные доклады были посвящены разработке датчиков, в том числе датчиков из макроволоконных композитов для обнаружения трещин и оптических решеток Брэгга для дефектоскопии. Также обсуждалось использование сварных швов в конструкции датчиков МТСК и моделирования для определения вероятности обнаружения (дефектов) для различных конфигураций датчиков МТСК. Был представлен новый способ использования естественных резонансов в конструкции, как для небольших компонентов с использованием изгибных режимов колебаний, так и для больших конструкций, где были рассмотрены колебания в корпусе контейнеровоза. Были также доклады по конкретным применениям, описывающие применение МТСК для компонентов промышленного оборудования, опорного «корсета» ядерного котла и коррозионного мониторинга.

МТСК — это многопрофильная область, которая быстро меняется в связи с технологическими достижениями, и в которой в настоящее время нет хорошо организованной стандартизации. Это важная область для МИС, поскольку все сварные или другим образом соединенные конструкции требуют мониторинга, чтобы продлить срок их службы и обеспечить непрерывную безопасную работу. МТСК представляет интерес для ряда Комиссий МИС и является темой, которой МИС по-прежнему будет заниматься путем проведения семинаров и через совместную деятельность Комиссий.



УКРАЇНСЬКОМУ ТОВАРИСТВУ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ТА ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ – 25 РОКІВ

16 листопада 1990 р. на Установчій конференції було створено Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики – творчу громадську організацію, яка об'єднує на добровільних засадах науковців, інженерів, викладачів та робітників-новаторів різних установ та підприємств, професійна діяльність яких пов'язана з неруйнівним контролем та технічною діагностикою.

Товариство започатковане з ініціативи ряду спеціалістів Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України, Національного технічного університету „Київський політехнічний інститут” за підтримки президента Національної академії наук України академіка Б.Є.Патона та президента Спілки наукових та інженерних об'єднань України академіка В.І. Трефілова. Конференція прийняла Статут Товариства, обрала правління та голову. Товариство зареєстроване в Міністерстві юстиції України як всеукраїнське об'єднання.

Сьогодні колективними членами УТ НКТД є біля 200 організацій, діяльність яких пов'язана з неруйнівним контролем та технічною діагностикою. Серед них ДП «КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля, Нижньодніпровський трубопрокатний завод, Одеський припортовий завод, Сумський завод «Насосенергомаш», ДП «Завод імені Малишева», ВАТ «Азовзагальмаш», ВАТ «Укргідроенерго», НВЦ «Техдіагаз» ДК «Укртрансгаз», Чернівецький машинобудівний завод, АТ «Мотор-Січ», Сумське машинобудівне науково-виробниче товариство, Новомосковський трубний завод, ВАТ «Металургійний комбінат «Азовсталь», Дніпропетровський трубний завод, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Національний авіаційний університет, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України та багато інших.

Головною метою Товариства є консолідація зусиль науково-технічних працівників та новаторів виробництва для розвитку їх творчої та ділової активності, реалізації свободи творчості та обмі-

ну інформацією, розширення співробітництва та міжнародних контактів, комплексного вирішення проблем підвищення якості та надійності промислових виробів і споруд, захисту творчих та інших спільних інтересів.

На останній звітній конференції в 2012 р. обговорено роботу Товариства та обрано новий склад Правління. Головою Товариства переобрано проф. Троїцького В.О., зав. відділом ІЕЗ ім. Є.О. Патона, заступниками – проф. Карпаша О.М., проктора Івано-Франківського Національного технічного університету нафти та газу, Мозгового О.В., директора Придніпровського АЦНК та канд. техн. наук. Казакевича Л.М., директора НВФ «Колоран».

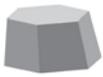
Ученим секретарем Товариства обрано Шеке-ро А.Л., провідного інженера ІЕЗ ім. Є.О. Патона.

Регіональні відділення Товариства працюють в Києві, Харкові, Дніпропетровську, Одесі, Запоріжжі, Львові, Івано-Франківську та інших містах України.

Активістами Товариства виконані організаційні роботи по створенню Технічного комітету із стандартизації «Технічна діагностика і неруйнівний контроль» – ТК-78. Комітет створено спільним наказом Національної академії наук України, Державного комітету по стандартизації, метрології і сертифікації та Державного комітету по нагляду за охороною праці (№ 60/106/48 від 31 травня 1993 р.). Головою ТК-78 призначено академіка Б.Є. Патона.

Надзвичайно важливе значення для України має організація системи сертифікації персоналу, зайнятого в неруйнівному контролі за процедурами, гармонізованими з європейськими та міжнародними стандартами. Цьому питанню УТ НКТД приділяє першочергову увагу. На сьогодні створена база для повного переходу до сертифікації персоналу з НК згідно з міжнародними нормами. УТ НКТД та ТК-78 провели роботу з гармонізації стандартів EN 473 та EN ISO 9712 «Кваліфікація і сертифікація персоналу в галузі НК. Основні принципи» і сприяли їх введенню в дію в Україні.

1994 р. з ініціативи УТ НКТД спільним наказом № 172/64/106/221 від 7 липня 1994 р. Мініс-



терства освіти України, Національної академії наук України, Державного комітету України по нагляду за охороною праці і Державного комітету України по нагляду в атомній промисловості був створений Національний атестаційний комітет України з неруйнівного контролю (НАКУНК).

Головним завданням НАКУНК була організація системи сертифікації персоналу в країні, яка відповідає міжнародним стандартам. Зусиллями активістів УТ НКТД були розроблені нормативні документи з сертифікації персоналу в нафтогазовій промисловості, на трубних заводах, для об'єктів підвищеної небезпеки. Сьогодні в Україні працюють п'ять органів сертифікації персоналу, акредитовані в Національному агентстві з акредитації України. Роботи з розвитку системи сертифікації в галузі неруйнівного контролю продовжуються.

Товариство сприяє виданню фахового науково-технічного журналу «Технічна діагностика і неруйнівний контроль», готуючи до публікації статті, повідомлення, інформацію та ін. З 1998 р. УТ НКТД самостійно видає інформаційний бюлетень «НК-Інформ».

Одним з головних напрямків роботи УТ НКТД є організація і проведення конференцій, семінарів та виставок. Першу, другу та третю Українські науково-технічні конференції «Неруйнівний контроль та технічна діагностика», організовані УТ НКТД спільно з ДП «КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля було проведено в 1994, 1997 та 2000 рр. в Дніпропетровську. Наступні четверта–сьома Національні науково-технічні конференції «Неруйнівний контроль та технічна діагностика», організовані УТ НКТД, проводились в Києві в 2003, 2006, 2009 та 2012 р.

Щорічну конференцію та виставку «Неруйнівний контроль» організовує Асоціація «ОКО». До 2012 р. більше 20-ти щорічних конференцій було проведено в осінньому Криму (організатор – Український інформаційний центр «Наука. Техніка. Технологія») та в зимовому Славську, Львівської обл. (організатор – Центр «Леотест-Медіум»).

Періодично конференції та семінари, де розглядаються питання неруйнівного контролю, орга-

нізуюють НТУУ «Київський політехнічний інститут», Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України, НВФ «Ультракон», «Діагностичні прилади», «Машинобудування», представництва провідних західноєвропейських фірм та ін.

Значну увагу правління УТ НКТД приділяє контактам та співробітництву з такими ж товариствами з інших країн.

У 1995 р. УТ НКТД прийнято до складу Європейського комітету з неруйнівного контролю. У 1998 р. УТ НКТД став співзасновником Європейської федерації з неруйнівного контролю (EFNDT), до якої входять Товариства з неруйнівного контролю 27 країн Європи.

УТ НКТД є членом Міжнародного комітету з неруйнівного контролю (ICNDT). Укладено ряд угод про співробітництво з товариствами Польщі, Чехії, Болгарії, Хорватії, Німеччини, Великобританії, Італії, Данії, США, Росії, Білорусі та ін.

На запрошення УТ НКТД в 2001 р. Україну відвідав Президент Міжнародного комітету з неруйнівного контролю доктор Джузеппе Нардоні, а в 2014 р. – голова технічного комітету TC-135 «Non-Destructive Testing» Міжнародної організації із стандартизації (ISO) Hajime Natano.

Делегації УТ НКТД приймали участь Європейських та Всесвітніх конференціях і виставках з неруйнівного контролю: в Копенгагені (7 ECNDT-1998), Римі (15 WCNDT-2000), Барселоні (8 ECNDT-2002), Монреалі (16 WCNDT-2004), Берліні (9 ECNDT-2006), Шанхаї (17 WCNDT-2008), Москві (10 ECNDT-2010), Дурбан (18 WCNDT-2012), Празі (11 ECNDT-2014).

В секретаріаті УТ НКТД, що працює в ІЕЗ ім. С.О. Патона (тел.: 044-200-46-66, 044-205-22-49, тел./факс 044-205-31-66, E-mail: usndt@ukr.net; www.usndt.com.ua), Ви зможете ознайомитись з новинами в галузі неруйнівного контролю та технічної діагностики, програмами конференцій, семінарів та виставок, періодичними виданнями, книгами тощо. Ви також зможете одержати консультації з питань неруйнівного контролю та технічної діагностики, обговорити шляхи вирішення конкретних питань практичного технічного контролю.

*Троїцький В.О., Посипайко Ю.М., Шекеро А.Л.
ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України*



О ЦЕНТРЕ СЕРТИФИКАЦИИ УКРАИНСКОГО ОБЩЕСТВА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики (УО НКТД) – всеукраинская общественная организация, объединяющая специалистов Украины, работающих в области дефектоскопии промышленных и гражданских объектов.

УО НКТД является соучредителем Европейской федерации НК (EFNDT) и полным членом Международного комитета по НК (ICNDT). Основным направлением деятельности УО НКТД является сертификация персонала, выполняющего неразрушающий контроль.

С этой целью в 1994 г. по инициативе УО НКТД и Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины приказом № 172/64/106/221 от 7 июля 1994 года Министерства образования Украины, Национальной академии наук Украины, Государственного комитета Украины по надзору за охраной труда и Государственного комитета Украины по надзору в атомной промышленности был создан Национальный аттестационный комитет Украины по НК (НАК Украины по НК), которому было поручено организовать в стране обучение, аттестацию и сертификацию персонала НК по Международному ISO 9712 и Европейскому EN 473 стандартам.

В состав НАК вошли ведущие специалисты Национальной академии наук Украины, Госнадзорхрантруда Украины, технических университетов и других профильных организаций Украины.

В 2001 г. усилиями НАК Европейский стандарт EN 473 по сертификации персонала был введен в действие в Украине как национальный, а в 2002 г. – при Украинском обществе НКТД был создан Центр сертификации (ЦС) и по аналогии с американским (ASNT), немецким (DGZfP), британским (BINDT) и другими обществами был разработан стандарт СТТУ УТНКТД 01 «Система сертификации персонала з НК».

ЦС при УО НКТД проводит сертификацию специалистов на 1–3 уровни квалификации по таким методам: ультразвуковому, радиографическому, магнитному, капиллярному, визуальному, контролю герметичности, вихретоковому, акустико-эмиссионному, тепловому, вибродиагностическому в 12 производственных секторах.

Сектора по типу продукции:

1 – литые (с) – ферритные и неферритные материалы;

2 – поковки (f) – ферритные и неферритные материалы;

3 – сварные изделия (w) – все типы сварных соединений, включая паяные, для ферритных и неферритных материалов;

4 – трубы и трубопроводы, включая листовой прокат для изготовления сварных труб (t) – бесшовных, сварных, из ферритных и неферритных материалов, включая листовой прокат для изготовления сварных труб;

5 – прокат (wp) – листовой, профильный.

Промышленные сектора:

6 – производство и обработка металлов (сочетания с, f, w, t и wp);

7 – контроль перед введением и в процессе эксплуатации, включая производство и обработку металлов (сочетания с, f, w, t и wp);

8 – железнодорожный транспорт и изделия для него (сочетания с, f, w, t и wp);

9 – авиакосмическая продукция (сочетания с, f, w, t и wp);

10 – продукция судостроения (сочетания с, f, w, t и wp);

11 – оборудование для атомной энергетики (сочетания с, f, w, t и wp);

12 – буровое оборудование (сочетания с, f, w, t и wp).

Сертификация в ЦС проводится в соответствии с Национальным стандартом ДСТУ EN ISO 9712 «Неразрушающий контроль. Квалификация и сертификация персонала, занятого в неразрушающем контроле. Общие принципы», Европейским EN ISO 9712, международным ISO 9712, Американским SNT-TC-1A и последней версией стандарта СТТУ УТНКТД 01-2013.

Руководители УО НКТД и ЦС являются членами американского, российского, немецкого и других обществ НК, Международной академии по НК, работают в Европейской федерации по НК (EFNDT) и в Международном комитете по НК (ICNDT).

ЦС при УО НКТД аккредитован Национальным агентством по аккредитации Украины (НААУ) (Аттестат аккредитации № 60001) как вневедомственный независимый орган по сертификации персонала в области неразрушающего контроля на соответствие требованиям Международного стандарта ISO/IEC 17024:2012 «Общие требования к органам по сертифика-



ции персонала. Оценка соответствия». Схема и процедуры сертификации персонала в области НК определены в соответствии с требованиями EN ISO 9712:2012.

В системе сертификации персонала ЦС при УО НКТД работают восемь учебных центров (УЦ) – УЦ «АЦНК при ИЭС им.Е.О.Патона НАНУ»; УЦ Приднепровского АЦНК и ТД; УЦ АЦНК УкрГМК НПП «Днепрочерметавтоматика»; Центр подготовки при ООО «Морское бюро Регистра»; УЦ при ОАО ХК «Луганск-тепловоз»; УЦ по НК СПКТБЗТ «Инфратранспроект-ДИ-ИТ»; УЦ ГП «Диамех-Украина»; УЦ «OUNORTH DEVICES» (Таллин; Эстония) и шесть экзаменационных центров (ЭЦ) – ЭЦ «АЦНК при ИЭС им. Е.О.Патона НАНУ»; ЭЦ «Приднепровский

АЦНК и ТД» ЭЦ АЦНК УкрГМК НПП «Днепрочерметавтоматика»; ЭЦ при ООО «Морское бюро Регистра»; ЭЦ Центра ТД и НК на железнодорожном транспорте; ЭЦ ГП «Диамех-Украина».

В европейских странах интенсивно идет процесс гармонизации программ обучения и аттестации персонала, которые со временем будут едиными для Европы. Постепенно устраняются барьеры, которые искусственно создают ведомства. Это расширяет возможности как сертифицированных специалистов, так и руководителей производств, работающих в разных отраслях.

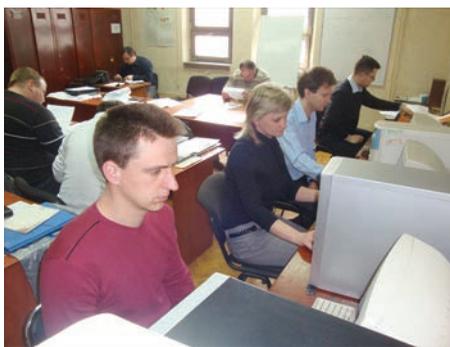
Документы, выдаваемые ЦС при УО НКТД признаются как в Украине, так и в других странах.

Число специалистов с европейской сертификацией в Украине растет с каждым годом. За прошедшие годы в ЦС прошли обучение и получили сертификаты около 70 специалистов из стран ближнего и дальнего зарубежья. В процессе выполнения проекта Международного агентства по атомной энергии (ИАЕА) было проведено обучение и сертификация нескольких групп специалистов из разных стран.

Учебная база ЦС постоянно расширяется и обновляется, совершенствуются программы обучения, методики преподавания и проведения экзаменов, пополняется парк учебных и экзаменационных образцов, совершенствуется и внедряется процедура сдачи экзаменов с помощью компьютерных программ, разрабатываются учебные пособия по различным методам НК для заочного обучения.

Центр сертификации при УО НКТД находится в одном из ведущих научных и технологических центров Украины – Институте электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины. Преподавательский и методический состав ЦС состоит из высококвалифицированных специалистов, имеющих большой практический опыт работы в области НК и технологий неразъемных соединений, наплавки, сварки, металлургии.

ЦС при УО НКТД ведет большую методическую работу, сотрудничает с международными организациями: EFNDT, ICNDT, ISO, CEN, IAEA и др., оказывает помощь в проведении научных семинаров и конференций по актуальным новым направлениям в области НК, в том числе в вы-





полнении европейских проектов. Эти особенности отличают ЦС при УО НКТД от многочисленных ведомственных и частных органов сертификации персонала по НК.

По мнению Бюро НАК Украины по НК Центр сертификации УО НКТД может проводить сертификацию специалистов в соответствии с Прави-

лами НПАОП 0.00-1.63-13, которые в свое время НАК готовил для Госнадзорохрантруда Украины. Это обеспечивает возможность комплексной сертификации по ДСТУ EN ISO 9712 и НПАОП 0.00-1.63-13, что исключает необходимость получения однотипных документов и уменьшает стоимость сертификации.

Шекеро А.А.

ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ



СЕМІНАР З НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

24–25 листопада 2015 р. в Києві проведено семінар «Неруйнівний контроль: стандарти, регламенти, сертифікація, випробування». Семінар організовано ТОВ «Діагностичні прилади» за підтримки Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики і Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. Проходив він в рамках Міжнародного промислового форуму в Виставковому центрі на Броварському проспекті.

Вступним словом відкрив семінар голова Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики проф. Троїцький В.О. Він наголосив, що з 2016 року Україна має переходити від стандартів СРСР (ГОСТів) на стандарти Європейського Союзу. У зв'язку з гармонізацією законодавства України з законодавством ЄС в Україні прийняті Закони «Про стандартизацію» та «Про технічні регламенти і оцінку відповідності». Це вимагає нових підходів до оцінки якості продукції, її випробувань, сертифікації та акредитації.

Перша частина семінару була присвячена питанням стандартизації та сертифікації в неруйнівному контролі. Учасники прослухали доповіді:

1. *Щупак С.А.* (ІЕЗ ім. Є.О.Патона). Директиви Європейського Союзу, модулі оцінки відповідності, обов'язкова сертифікація, маркування СЕ, гармонізовані стандарти.

2. *Щупак С.А.* (ІЕЗ ім. Є.О.Патона). Закони України «Про стандартизацію» та «Про технічні регламенти і оцінку відповідності».

3. *Хорло М.Ф.* (ПАТ «ВТП «Укренергочормет»). Алгоритми практичного переходу від стандартів ГОСТ на стандарти EN та ISO з ультразвукового та магнітного методів неруйнівного контролю.

4. *Поситайко Ю.М.* (ІЕЗ ім. Є.О.Патона). Перехід від стандартів ГОСТ на стандарти EN та ISO з

візуального, капілярного, вихрострумового, радіаційного контролю та течошукання.

5. *Щупак С.О.* (ІЕЗ ім. Є.О.Патона). Сертифікація персоналу НК: добровільна, законодавчо регульована в сфері дії технічних регламентів та нормативно-правових актів з охорони праці. Вимоги до органів сертифікації персоналу, акредитація та призначення.

В другій частині семінару учасники прослухали доповіді про сучасні засоби неруйнівного контролю, що відповідають найвищим вимогам європейських стандартів:

1. *Жак Руссіль* (Франція, СН). Сучасні системи радіографії від Carestream Health: огляд, нові можливості, особливості застосування.

2. *Глабець С.М.* (ТОВ «Діагностичні прилади»). Дефектоскопи OmniScan (Olympus-IMS), застосування технологій фазованих решіток і TOFD, особливості, переваги.

3. *Павлій А.І.* (ТОВ «Діагностичні прилади»). Вихрострумові дефектоскопи Olympus-IMS.

4. *Бухенський В.М.* (ІЕЗ ім. Є.О.Патона). Застосування портативних рентгенотелевізійних систем для виявлення дефектів зварних з'єднань трубопроводів.

5. *Yoann Goorissen* (Бельгія, ICM). Портативні генератори рентгенівського випромінювання ICM.

6. *Козін О.М.* (ТОВ «Діагностичні прилади»). Магнітопорошковий контроль. Технології і обладнання для контролю виробів у машинобудуванні й металургії.

7. *Яременко Ю.* (MR-Chemie GmbH). Екологічно чисті матеріали для капілярної дефектоскопії.

Наступний семінар з цієї тематики буде проведено в 2016 р. в рамках Міжнародного промислового форуму.

Поситайко Ю.М., Щупак С.О.

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України

ПОДПИСКА — 2016

на журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»

Украина		Россия		Страны дальнего зарубежья	
на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
240 грн.	480 грн.	1800 руб.	3600 руб.	30 дол. США	60 дол. США
В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.					



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

Подписка на электронную версию журнала
«Техническая диагностика и неразрушающий контроль»
на сайте: www.patonpublishinghouse.com.

Правила для авторов: www.patonpublishinghouse.com/rus/journals/tdnk/rules
Лицензионное соглашение: www.patonpublishinghouse.com/rus/journals/tdnk/license
В 2015 г. в открытом доступе архивы статей журнала за 2003–2013 гг.

РЕКЛАМА в журнале «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»

Реклама публикуется на обложках и внутренних вклейках следующих размеров

- Первая страница обложки (190x190 мм)
- Вторая, третья и четвертая страницы обложки (200x290 мм)
- Первая, вторая, третья, четвертая страницы внутренней обложки (200x290 мм)
- Вклейка А4 (200x290 мм)
- Разворот А3 (400x290 мм)
- 0,5 А4 (185x130 мм)
- 0,25 А4 (90x130 мм)
- Размер журнала после обрезки 200x290 мм

- В рекламных макетах, для текста, логотипов и других элементов необходимо отступать от края модуля на 5 мм 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

Стоимость рекламы и оплата

- Цена договорная
- По вопросам стоимости размещения рекламы, свободной площади и сроков публикации просьба обращаться в редакцию

- Оплата в гривнях или рублях РФ по официальному курсу

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

- Для постоянных партнеров предусмотрена система скидок

- Стоимость публикации статьи на правах рекламы составляет половину стоимости рекламной площади

- Публикуется только профильная реклама (техническая диагностика и неразрушающий контроль)

- Ответственность за содержание рекламных материалов несет рекламодатель

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

Подписано к печати 15.12.2015. Формат 60×84/8. Офсетная печать.
Усл. печ. л. 9,04. Усл.-отт. 9,89. Уч.-изд. л. 10,24
Печать ООО «Фирма «Эссе».
03142, г. Киев, просп. Академика Вернадского, 34/1.