Международный научно-технический и производственный журнал

# ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА и Неразрушающий контроль

# № 4, 2014

Издается с 1989 г. Выходит 4 раза в год

**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. Клюев ЗАО НИИИН МНПО «Спектр», Москва, РФ 3. Т. Назарчук, В. Н. Учанин Физ.-мех. ин-т, Львов, Украина H. 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. Фомичов

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. Середа, 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

# НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

НЕКЛЮДОВ І. М., НАЗАРЧУК З. Т., СКАЛЬСЬКИЙ В. Р.,
ДОБРОВОЛЬСЬКА Л. Н. Застосування методу
акустичної емісії для діагностування корпусів ядерних
реакторів (огляд). Повідомлення II. Метод акустичної емісії в
діагностуванні корпусів реакторів АЕС. Частина 1 3
НЕДОСЕКА А. Я., НЕДОСЕКА С. А., ГРУЗД А. А.
Исследование акустико-эмиссионных характеристик
стали 12Х18Н10Т при температуре 560 °С. Сообщение 2.
Повреждаемость и прогноз разрушения 12
НЕДОСЕКА А. Я., НЕДОСЕКА С. А., СМОГОЛЬ Ю. А.,
КОЗАКОВ А. А. Длительная прочность материалов,
работающих при высоких температурах, по данным
акустической эмиссии 17
ДАВИДЕНКО В. Ф. Теория ультразвуковой
эхо-амплитудной дефектометрии. Развернутая модель
ультразвукового поля эхо-канала
МИРЗОВ И. В. Компьютерное моделирование вязкого
разрушения сварного соединения в образце Шарпи 32

# ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

ΠΥΕΔ Β. ΠΥΡЫНИН Β.Δ. ΡΔ3ЫΓΡΔΕΒ.Δ.Η	
РАЗЫІ РАЕВ Н. П., ХАРИНА И. Л., ЛОБАНОВ Л. М., ,	
МАХНЕНКО В. И., МАХНЕНКО О. В., САПРЫКИНА Г. Ю.	
Разработка методик ультразвукового контроля и	
определения работоспособности узла приварки коллек-	
тора к парогенератору ПГВ-1000М	36
ЕРКО Е. А., ШАПОВАЛОВ Е. В., КОЛЯДА В. А.	
Путеизмерительный комплекс КВ-1П	52

# ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ

Конференція «Стратегія развитку системи технічного	
регулювання України	57
11-я Европейская конференция по неразрушающему	
контролю – главное событие 2014 года в мире НК	58
Флэш-радиография – будущее радиационного контроля	63

ИЗДАНИЕ ПОДДЕРЖИВАЮТ: Технический комитет по стандартизации «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» ТК-78 Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики International Scientific-Technical and Production Journal

# TEKHNICHESKAYA DIAGNOSTIKA

# № 4, 2014

# NERAZRUSHAYUSHCHIY KONTROL

Published since 1989 Quarterly issue

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

CONTENTS

# SCIENTIFIC-TECHNICAL

NEKHLYUDOV I.M., NAZACHUK Z.T., SKALSKII V.R., DOBROVOLSKA L.N. Application of acoustic emission method for diagnostics of nuclear reactor bodies (review). Information II. Method of acoustic emission in diagnostics of NPP reactors. Part 1
NEDOSEKA A. YA., NEDOSEKA S. A., GRUSD A. A.
Investigation of acoustic emission characteristics
of 12Kh18N10T steel at the temperature of 560° C.
Information 2. Damageability and fracture prediction
NEDOSEKA A. YA., NEDOSEKA S. A., SMOGOL YU. A., KOZAKOV A. A. Long-term strength of materials operating at high temperatures, based on acoustic emission data
DAVIDENKO V. F. Theory of ultrasonic
echo-amplitude defectometry. Expanded model of ultrasonic
field of echo-channel
MIRSOV I.V. Computer modeling of welded joint tough
fracture in a Charpy sample

# INDUSTRIAL

DUB A.V., DURYNIN V. A., RAZYGRAEV A. N., RAZYGRAEV N. P., KHARINA I. L., LOBANOV L. M.,	
MAKHNENKO V. I., MAKHNENKO O. V., SAPRYKINA G. YU. Development of ultrasonic	
testing procedures and determination of performance of the assembly of the joint of header to steam	
generator PGV-1000M	36
ERKO E.A., SHAPOVALOV E.V., KOLYADA V.A. Track-measuring complex KV-1P	52
NEWS AND INFORMATION	
Conference on «Strategies of development of technical	

regulation system of Ukraine»	57
11 <sup>th</sup> European Conference on Non-Destructive Testing – 2014 Major Event in NDT World	58
	50

Flash-radiography is the future of radiation control.......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

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

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief

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.

# ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ ДЛЯ ДІАГНОСТУВАННЯ КОРПУСІВ ЯДЕРНИХ РЕАКТОРІВ (огляд) Повідомлення II. Метод акустичної емісії в діагностуванні корпусів реакторів АЕС. Частина 1

#### І. М. НЕКЛЮДОВ, З. Т. НАЗАРЧУК, В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ, Л. Н. ДОБРОВОЛЬСЬКА

Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАНУ. 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5. E-mail: skal@ipm.lviv.ua

Перші акустико-емісійні (AE) вимірювальні системи виробничого зразка та встановлені кореляції між параметрами сигналів AE та показниками розвитку руйнування були створені у другій половині XX сторіччя. Саме це й стало підставою зацікавлення розробників атомних енергетичних технологій та експлуатаційників цим новим методом, який згодом стане ефективним доповненням до існуючих технологій неруйнівного контролю (HK) для виявлення та моніторингу дефектів корпусів ядерних реакторів. Оскільки до таких об'єктів поставлено винятково високі вимоги якості та цілісності, то вже в кінці 1970-х років було спрямовано значні зусилля на розвиток методу AE і запровадження його у виробництво. Практична реалізація засобів і методик AE-моніторингу та діагностування стану корпусів реакторів AEC підтвердила високу ефективність методу, хоча на початках їх становлення були різні твердження щодо цього.

Ключові слова: акустична емісія, показники розвитку руйнування, атомні енергетичні технології, виявлення та моніторинг дефектів

Стан проблеми. Впровадження методу АЕ у систему технічного діагностування обладнання АЕС, у тому числі і корпусів ядерних реакторів, має тривалу історію. Численні АЕ-дослідження стосувалися моніторингу розвитку тріщиноподібних дефектів, виявлення витоків теплоносія та контролю незалікованих конструкційних елементів. Серед результатів впровадження відзначимо налагоджений моніторинг розвитку тріщин у патрубкових зонах корпусів ядерних реакторів на AEC Limerick (реактор типу BWR) та Watt Bar (реактор типу PWR). Проведені АЕ-випробування продемонстрували здатність засобів вимірювання відокремлювати корисні сигнали, що генеруються внаслідок підростання тріщини, від акустичних шумів, які виникають у першому контурі внаслідок руху теплоносія. Моніторинг при цьому провадився за умов, коли температура корпуса реактора сягала 300 °С [1].

У 1960–1970-х рр. були створені перші АЕ-системи виробничого зразка та встановлені кореляції між параметрами сигналів АЕ та показниками розвитку руйнування [2–4]. Це спричинило значне пожвавлення серед розробників атомних енергетичних технологій, подавши надію, що новий метод стане ефективним доповненням до існуючих технологій НК у виявленні та моніторингу дефектів корпусів ядерних реакторів, до яких ставили винятково високі вимоги якості та цілісності. Тому значні ресурси та зусилля почали спрямовувати на розвиток методу АЕ.

На період 1965–1975 pp. припадає великий обсяг науково-дослідних робіт, спрямованих на вивчення методу АЕ та його впровадження у ядерну енергетику [5]. Цьому суттєво сприяв розвиток електроніки та покращення якості п'єзокерамічних перетворювачів, що дозволило АЕ-системам досягнути таких характеристик, за яких стало можливим реєструвати не тільки ріст тріщин, але й рух дислокацій у метала. Останнє мало величезне значення для дослідження руйнувань корпусних реакторних сталей, які відзначаються своєю високою пластичністю [6]. Сприяло розвитку АЕ і намагання розробників ядерних реакторів забезпечити так званий 100 %-ний контроль цілісності корпусів. Повне сканування металу за допомогою існуючих нормативних методів (ультразвукова дефектоскопія, радіографія) було дуже затратним. При цьому не можна було гарантувати, що якийсь із наявних у металі дефектів не виявиться прихованим для НК. Впровадження методу АЕ з огляду на суттєву відмінність його від інших методів НК давало надію на розв'язання цієї проблеми.

Серед дослідників, що активно розвивали метод АЕ для моніторингу цілісності корпусів ядерних реакторів у цей період, відзначимо Бентлі [5, 7], Ватанабе [8–10], Гаттона [11–13], Гартбовера і Гріна [14, 15], Данегана і Гарріса [2, 3, 16–19], Їнґа [20–24], Ліптая і Татро [6], Палмера [25–28], Перрі [29–33], Поллока [34, 35], Синклера [36, 37] та ін. [38, 39]. Одним із найвагоміших постатей у цьому списку є Гаттон, праці якого охоплюють тематику від характерних АЕ-ознак руйнування до АЕ-інструментарію та впровадження цього методу у нормативну базу. Вже у своїх ранніх працях

# НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ-

дослідник приділив достатню увагу спектральним характеристикам як АЕ-сигналів, так і існуючих під час роботи реактора виробничих шумів [11]. Виявляється, що для ефективного АЕ-контролю слід зменшити не тільки вплив шумів, які генерують машинами та працююче обладнання на частотах нижче 20....50 кГц, але і вплив завад, що утворюються внаслідок кавітації, спричиненої роботою циркуляційних помп та засувок. При цьому їх спектр виявляв значну амплітуду навіть до частоти 1000 кГц. Це було встановлено на одному з діючих реакторів у США. Намагаючись виділити корисний сигнал. Гаттон запропонував для моніторингу руйнування корпусної сталі використати частотний діапазон 750...3000 кГц як оптимальний для таких умов. Крім механічних шумів, перехідні електричні процеси від переключень різного обладнання спричиняли сигнали, які можна було сплутати з сигналами АЕ. Однак цю проблему вдалося вирішити [34]. Продовжуючи дослідження спектральних характеристик сигналів АЕ за умов присутності кавітаційних шумів, що виникають у теплоносії першого контуру, Гаттон дійшов висновку, що для виділення корисного сигналу більш відповідними є перетворювачі з вищою чутливістю до поперечних хвиль АЕ. Використовуючи такі перетворювачі з робочою смугою 1500...2500 кГц, вплив кавітації був зменшений, а реєстрування корисних сигналів АЕ можна було ефективно здійнювати на віддалі до 1 м від джерела.

Гаттон також запропонував впровадження методу АЕ на етапі виготовлення корпусів реакторів [13]. Виявилось, що АЕ-контроль зварювання дозволяє в режимі реального часу виявляти дефекти зварного з'єднання, коли частинки шлаку попадають у зварний шов у процесі автоматичного зварювання під флюсом. Згодом це було підтверджено у оглядовій праці Гарріса–Данегана [16].

Застосовуючи акустичну емісію, дослідники сподівались також вдосконалити методики оцінювання радіаційного окрихчування реакторних матеріалів. Наприклад, в роботі Їнґа під час динамічного розтягу гладких та WOL зразків, виготовлених із низьковуглецевої корпусної сталі А302В, параметри (інтенсивність і сумарний рахунок імпульсів) сигналів АЕ суттєво зростали, коли зразки зазнавали радіаційного опромінення флюенсом 1,2·10<sup>19</sup> см<sup>-2</sup> за температури 290 °C [21]. Цей висновок згодом був підтверджений дослідженнями Гарріса і Данегана [19].

Застосування методу АЕ для діагностування корпусів реакторів АЕС. У 1967–1971 рр. опубліковано праці Перрі про використання методу АЕ для неруйнівного виявлення розвитку тріщини на ядерному обладнанні, включно з товстостінними корпусами ядерних реакторів [29–33]. Автор зазначає, що АЕ від підростання тріщин у першому контурі ядерного реактора можна реєструвати під час його роботи, причому параметри АЕ-сигналів від підростання тріщини відрізняються від акустичних шумів, що генеруються в процесі роботи реактора. Характерні особливості АЕ-сигналів визначалися під час періодичних гідростатичних випробувань. Ці особливості, як виявилось, залежать від історії старіння та від поточного стану корпусу реактора. Згідно з висновками Перрі, таку інформацію, накопичену впродовж терміну експлуатування реактора, можна використати для оцінювання цілісності металоконструкцій та визначення ступеня експлуатаційного окрихчування металу [35]. Більше того, здатність методу АЕ виявляти місцезнаходження ростучого дефекту способом триангуляції, надає йому виняткової переваги. Геометрично-складна форма корпусу реактора вимагала використання більшої кількості АЕ-перетворювачів, однак застосування комп'ютера (IBM 7044) забезпечило високу швидкість розрахунку AE даних (10<sup>4</sup>...10<sup>6</sup> емісійних подій за годину) та можливість визначати розташування джерел АЕ з точністю до 25 мм на корпусі місткістю ~28 м<sup>3</sup> [34].

Вже у 1973 р. був опублікований звіт Перрі про американо-британські дослідження щодо застосування акустичних методів неруйнівного контролю на британському модельному реакторі лабораторії Калчет. Про підтримку досліджень щодо впровадження методу АЕ для НК корпусів ядерних реакторів згадується і в оглядовій статті Гарріса– Данегана 1974 р.[16]. Ця програма, фінансована Комітетом з Атомної Енергії США та Електричним Інститутом Едісона, передбачала виготовлення для дослідних цілей великої ємності, на якій можна було б відпрацьовувати АЕ-методики діагностування та моніторингу і встановлювати кореляції між параметрами сигналів АЕ та параметрами розвитку руйнування сталі.

У звіті 1974 р. щодо цілісності корпусів легко-водяних ядерних реакторів, підготовленим Комітетом з Атомної Енергії США [40], зазначено, що у першій половині 1970-х років американські державні та приватні структури провели розширені наради щодо використання методу АЕ для НК корпусів ядерних реакторів. У цих нарадах взяли участь співробітники таких організацій, як Battelle Memorial Institute, Pacific Northwest Laboratory, Dunegan Research Corp., Jersey Nuclear Corp., Southwest Research Institute, Teledyne Materials Research Ta Westinghouse Electric Corp. У звіті також зазначено, що НК корпусів реакторів не може гарантувати виявлення всіх дефектів металу. Для підвищення достовірності НК запропоновано підвищити чутливість радіографічного методу та точність ультразвукової дефектоскопії, а також впровадити метод АЕ. Рекомендовано вивчити ефективність та перспективність застосування методів АЕ та акустичної голографії на етапі виготовлення корпусу реактора і під час гідростатичних випробувань.

Зазначимо також, що значні зусилля спрямовано на впровадження методів АЕ, акустичної голографії та акустичної спектроскопії на діючих ядерних реакторах для відстежування їх цілісності під час роботи. Саме на ці методи покладали надії щодо точнішої локації активних дефектів та встановлення характеристик їх розвитку. Із подальшим вдосконаленням методу АЕ, вважали автори звіту, впровадження вимоги гідростатичних випробувань надлишковим тиском під час періодичних перевірок корпусів реакторів може стати реальністю. Без повноцінного НК із залученням різних методів такі перевірки небажані, оскільки сприяють розвитку втоми металу. У звіті підкреслена можливість включення методу АЕ у нормативну базу, тобто у Кодекс ASME.

У Великобританії застосуванням АЕ-контролю стану корпусів реакторів займалась група Синклера у Ядерних лабораторіях Берклі (Berkeley Nuclear Laboratories). Для цього були виготовлені дослідні ємності з високопластичної вуглецевої корпусної реакторної сталі BS1501-221, аналогічної до тієї, з якої був виготовлений корпус реактора Magnox [37]. Ємність мала 3.65 м довжини. 1,52 м діаметра та 25,4 мм товщини стінки. На підставі вивчення залежності параметрів АЕ-сигналів від стадій розвитку руйнування створеного дефекту, встановлено просту емпіричну формулу N = 2V, де N – сумарний рахунок імпульсів AE, V − об'єм (см<sup>3</sup>), що зазнав пластичного деформування перед вершиною тріщини. Таким чином, було показано, що метод АЕ дозволяє відстежувати в'язке руйнування високопластичного матеріалу, уможливлюючи в тому числі й локацію джерел АЕ (локаційні дослідження здійснювали за допомогою трьох перетворювачів АЕ).

Впровадження АЕ-моніторингу як допоміжного методу НК корпусів реакторів у Великобританії патронувала агенція UKAEA [5, 7]. Відповідну роботу вела у трьох напрямках. По-перше, було збудовано дослідницьку лабораторію, в якій під час гідростатичних випробувань за допомогою 10-канальної АЕ-системи можна було виявляти і визначати розташування невеликих тріщин як джерел АЕ у корпусі спеціально виготовленої ємності. Подібні лабораторії вже діяли, зокрема у США працювала промислова лабораторія National Reactor Test Site (Idaho Falls), в якій проводили численні АЕ-випробування [41]. По-друге, АЕ-вимірювання проводили на промислових великих ємностях. По-третє, значну кількість АЕ-вимірювань проводили в лабораторії як на зразках, що містили дефекти, так і на дослідних ємностях, виготовлених зі сталей низького та високого рівня міцності.

У цих роках опубліковано також низку інших праць, присвячених розвитку впровадження методу АЕ для НК ємностей, що працюють під тиском, у тому числі й корпусів ядерних реакторів [42-60]. Зокрема, у 1972 р. Ветрано і Джолі повідомляли, що зареєструвати та визначити розташування субкритичної тріщини, що росте у корпусі працюючого під тиском реактора, є цілком можливо, а метод АЕ є перспективним [44]. Ніколс і Кован зазначали, що АЕ є єдиним методом, який здатний доповнити існуючі методи НК для повного контролю цілісності корпусу реактора, як на етапі його виготовлення, так і перед уведенням в експлуатацію [45]. У своєму огляді Белл зазначав, що застосування методу АЕ є перспективним як під час гідростатичних випробувань, так і для моніторингу цілісності корпусів ядерних реакторів під час їх роботи [50]. І хоч у кожному з цих випадків застосування методу АЕ має свої переваги та недоліки, все ж стосовно цілісності корпусу він дає більше інформації, ніж будь-який інший метод НК.

Група Інггама вивчала залежності параметрів сигналів АЕ від категорії міцності сталі, а відтак від типу руйнування, а також від розміру зразка. Показано суттєву різницю у сигналах АЕ, отриманих від крихких та в'язких руйнувань, та перевірено формулу Данегана про залежність сумарного рахунку АЕ від в'язкості руйнування. На основі аналізу параметрів (сумарний рахунок та швидкість рахунку) сигналів АЕ запропоновано АЕ-рейтинг сталей. Крім того, підтверджено ефект Кайзера про невідтворюваність АЕ за повторного навантаження [51, 53]. Ці результати загалом підтверджували результати Палмера, який встановив, що АЕ під час руйнування в'язких реакторних сталей пов'язана з пластичним деформуванням металу перед вершиною тріщини, з огляду на що сигнали АЕ мають відносно низьку інтенсивність [26]. Вивчали також як змінюються характеристики сигналів АЕ із переходом від лабораторних зразків до ємності, що працює під тиском [54]. Зазначено, що під час циклювання тиску всередині ємності аж до її руйнування надійного реєстрування сигналів АЕ досягти не вдається, хоч на лабораторних зразках це не викликало жодних проблем.

У 1970 р. у Роттердамі відбувся Міжнародний симпозіум з питань неруйнівного контролю елементів ядерних реакторів. На ньому серед інших була представлена доповідь Гартбоувера щодо перспективності застосування АЕ-інструментів для виявлення докритичного підростання тріщин. Перевагою методу АЕ, зазначив аме-

# НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ-

риканський дослідник, є не тільки реєстрування самої події підростання тріщини, але й можливість її локації за допомогою методу триангуляції. Для впровадження методу АЕ рекомендовано провести детальний аналіз акустичних сигналів, які можуть генеруватися під час різних режимів роботи ядерних реакторів; покращити якість первинних АЕ-перетворювачів та ретельно дослідити особливості параметрів акустичних сигналів, які генеруються в реакторних матеріалах під час розвитку у них тріщиноподібних дефектів. У доповіді британського дослідника Турнера ішлося про розвиток інструментальної бази для АЕ-контролю та про металознавчі засади виникнення пружних хвиль АЕ в елементах конструкцій [61].

Вже через два роки, у 1972 р., у Лондоні відбулась міжнародна конференція з АЕ, на якій кілька доповідей були безпосередньо пов'язані з використанням методу АЕ на АЕС [62]. Наприклад, Перрі ділився досвідом впровадження методу АЕ компанією «Jersey Nuclear Co». Вибором АЕ-перетворювачів, оптимізацією їх розміщення на геометрично складних об'єктах контролю, характерними ознаками сигналів АЕ, їх опрацюванням та оцінкою за допомогою комп'ютера тощо займаються, зокрема, задля впровадження АЕ-контролю на корпусах реакторів. Представник EURATOM Вольта доповідав про АЕ-дослідження пластичної деформації металу за різних швидкостей деформування. Данеган розповів про перспективність методу АЕ для контролю корпусів ядерних реакторів та інших ємностей, що працюють під тиском.

В умовах підвищених температур та впливів інших чинників важливу роль у практичному використанні методу АЕ відіграють хвилеводи. Представник Британської агенції з атомної енергії UKAEA Даусон доповів про досвід впровадження АЕ-моніторингу на корпусі реактора за допомогою пересувної АЕ-лабораторії. Для прослуховування реактора використовували АЕ-перетворювачі з резонансною частотою 300 кГц, які приєднували до місць доступу. Показано, що така робоча частота АЕ-перетворювачів є найкращим компромісом між чутливістю, згасанням сигналу та наявним у досліджуваному об'єкті шумом. Представник Central Electricity Research Laboratory (Велика Британія) Могфорд доповів про досвід АЕ-досліджень ємностей під тиском. Такі ємності є досить «мовчазними» і потребують перетворювачів із високими коефіцієнтами підсилення, оскільки АЕ під час руйнування вуглецевих сталей і сплавів, з яких виготовлені корпуси реакторів, суттєво відрізняється від АЕ під час руйнування типових конструкційних матеріалів.

В цьому ж 1972 р. відбувся Американо-японський симпозіум з АЕ, а згодом, у 1974 р. - симпозіум у США, де були представлені досягнення в ділянці розробок акустико-емісійного обладнання [56]. Зокрема, компанія «Westinghouse Nuclear Energy System» ділилася своїми досягненнями у створенні системи АЕ моніторингу, призначеної для корпусів ядерних реакторів. Саме використовуючи дані такої системи доцільно здійснювати експлуатування ядерних реакторів, забезпечуючи їх безпечну роботу, вважали автори розробки. Крім того, застосування цієї системи АЕ-моніторингу було економічно обґрунтованим, оскільки для моніторингу нею цілісності обладнання першого контуру потрібна резонна кількість первинних перетворювачів [56]. Компанія ставила перед системою АЕ-моніторингу такі три завдання:

1. Реєструвати та виявляти місцезнаходження підростаючої тріщини;

2. Оцінювати ріст цієї тріщини;

3. На підставі оцінок розміру дефекта давати рекомендації щодо наступного планового контролю чи умов експлуатування реактора.

Система АЕ-моніторингу корпусів ядерних реакторів та іншого обладнання першого контуру повинна задовольняти строгим вимогам [56]. Зокрема, первинні перетворювачі повинні бути стійкими до тривалого впливу високих температур та радіаційного опромінення. Ще серйознішою була проблема відокремлення корисного сигналу в умовах інтенсивних шумів, що генеруються і передаються обладнанням першого контуру в умовах експлуатування. Для цього робоча смуга частот системи АЕ-моніторингу повинна бути вищою від частотного діапазону домінуючих шумів, але при цьому суттєво нижчою від частот значного згасання пружних хвиль.

На початок 1970-х років компанія «Westinghouse» розробила первинні АЕ-перетворювачі, які могли впродовж років працювати в умовах високих температур, вологості і радіації. Іх можна було встановлювати без хвилеводів, а рівень сигналу на виході із них був достатнім, щоб без попереднього підсилювача передавати сигнал на віддаль понад 150 м. АЕ-сигнали подавали на вхід багатоканальної комп'ютеризованої системи моніторингу. Вона розраховувала розташування джерела АЕ-сигналу та швидкість проходження пружної хвилі, а відтак, показувала на дисплеї розташування активного дефекту. Система мала модульну конструкцію з однаковими інтерфейсами типу САМАС, що давало можливість швидко налаштувати її у залежності від потреби, містила модулі локації і підрахунку сигналів АЕ. Восьмиканальний локаційний модуль містив блоки: комутації, зондування, буферного накопичення, реєстрування. Другий з модулів теж відбирав

## – НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

8 АЕ-каналів для моніторингу, причому кожний канал містив 24-бітовий лічильних, що уможливлював реєстрування  $2^{24}$  АЕ подій. Ці двійкові дані проходили подальшу комп'ютерну обробку, результат якої виводили на СRT дисплей. Для визначення *x*, *y* координат активного джерела АЕ використовували принцип гіперболічної триангуляції. При цьому все обладнання першого контуру реактора було представлено у *x*–*y* координатній площині. Масиви АЕ-даних окремо від кожного первинного перетворювача та розраховані координати імпульсів щогодини записували на касети з магнітними стрічками [56].

Оскільки серйозною проблемою моніторингу корпусів ядерних реакторів була наявність широкої частотної смуги неінформативного шуму, перед розробниками АЕ-обладнання постало завдання відпрацювати методики в лабораторних умовах, наближених до реальних. Для цього Edison Electric Institute створив спеціальну лабораторію, модифікувавши експериментальний берилій-оксидний реактор EBOR, корпус якого мав 3,4 м у діаметрі, 7,9 м висоти і товщину стінки 8...20 см, тобто був співмірним із усіма промисловими ядерними реакторами. На цьому реакторі відпрацьовували різні методи НК, причому, крім робочих шумів, що виникали у працюючому обладнанні, створювали додаткові шуми зовнішніми генераторами. В корпусі реактора штучно створювали дефекти-концентратори напружень, які розвивались під дією гідростатичних напружень у період випробувань і розвиток яких відстежували АЕ системою [56].

Іншим напрямом були дослідження можливості застосування АЕ-моніторингу для виявлення і оцінки витоків теплоносія через наскрізні дефекти та ущільнення. Чутливість такої АЕ-системи вимірювання повинна була бути кращою, ніж 1,2 см<sup>3</sup>/с. Лабораторні випробування, проведені компанією «Westinghouse» показали, що їхнє обладнання може забезпечити реєстрування витоків зі швидкістю 0,9 см<sup>3</sup>/с, причому рівень корисного сигналу переважав рівень шумів приблизно на 65 дБ [56].

Відпрацювавши методики АЕ-моніторингу на дослідному реакторі EBOR, працівники Westinghouse провели серію випробувань власного обладнання на шести діючих АЕС США. У цих випробуваннях цікавили, зокрема, параметри згасання акустичних хвиль АЕ у корпусах промислових реакторів. Встановлено, що поверхневі неоднорідності (наприклад, зварний шов) посилюють згасання хвиль АЕ. Крім того, виявили, що параметри хвилі, створеної імітатором на внутрішній поверхні корпусу реактора, суттєво відрізняються від параметрів хвиль, відображення яких зареєстроване первинними перетворювачами, встановленими на зовнішній поверхні. Сигнал від хвилі, збудженої імітатором на зовнішній поверхні, має набагато стрімкіший фронт порівняно з сигналом, отриманим після збудження хвилі на внутрішній поверхні. Згасання хвиль в області накривки реактора виявились суттєвими, але сигнали АЕ можна успішно реєструвати первинними перетворювачами, встановленими на приварених вухах накривки. Зазначимо, що первинні перетворювачі встановлювали в місцях доступних, а не бажаних. Наприклад, встановити первинні перстворювачі в зоні «гарячого» пояса було неможливо через наявність біологічного захисту. Доступними виявились лише зона патрубків та дно корпуса. Серйозні обмеження доступу існували і у верхній частині, тому встановити первинні перетворювачі можна було лише на виступаючих монтажних вухах кришок [56].

Типові сигнали AE, зареєстровані під час гідростатичних випробувань корпусів ядерних реакторів, можна розділити на три групи [56]:

 тривалі сигнали зі стрімким фронтом і повільно згасаючою огинаючою відповідають поширенню тріщини та релаксації напружень у зварному шві;

 – сигнали з пологим фронтом і згасаючою огинаючою відповідають поширенню хвиль від зовнішнього механічного збудження;

 окремі імпульси є електрично наведеними шумами, оскільки вони синхронні у всіх каналах багатоканальної системи.

Встановлення цих закономірностей та ідентифікація джерел АЕ зумовили подальше вдосконалення АЕ-систем для контролю цілісності корпусів ядерних реакторів. Наприклад, АЕ-випробування корпусу ядерного реактора і обладнання першого контуру другого енергоблоку АЕС Calvert Cliffs, що знаходилась у підпорядкуванні енергетичної компанії Балтимору, здійснювали 64-канальною АЕ системою [63]. Гідростатичні випробування обладнання першого контуру із застосуванням АЕ-контролю здійснювали перед уведенням енергоблоку в експлуатацію відповідно до існуючої на той час нормативної бази ASME стосовно ємностей, що працюють під тиском. Первинні п'єзокерамічні перетворювачі з резонансною частотою 140 кГц встановлювали на феритно-перлітні елементи за допомогою магнетних тримачів, а на аустенітні елементи – за допомогою відповідного клею. АЕ дані записували безперервно під час наростання тиску до 220 атм (21,6 МПа). Було виявлено 35 джерел АЕ незначної інтенсивності (джерела категорій В і С за трирівневою системою оцінювання). Після АЕ-випробувань місця локації виявлених джерел емісії провели розгорнуті обстеження цілісності металу з використанням інших методів НК, які не виявили жодних дефектів, що перевищують гранично

# НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ-

допустимі розміри відповідно до Кодексу ASME. Із виявлених в обладнанні першого контуру 35 джерел AE 13 належало корпусу ядерного реактора, а два – кришці. Дев'ять із цих 15 джерел було класифіковано до AE-категорії C, п'ять – перехідних від C до B і лиш один був віднесений до категорії C. Щодо місця локації, то переважна більшість стосувалася дрібних дефектів у патрубках (10). Решта – у зварних швах корпусу (3) та біля каналів системи контролю реактора (2).

Успішне впровадження АЕ-методу на корпусах ядерних реакторів вимагало поглиблення знань про природу акустичних сигналів, що генеруються за тих чи інших механізмів руйнування металу. Вже у першій половині 1970-х років з'являються праці, зосереджені на спектральних характеристиках АЕ-сигналів [55]. Ці дослідження мали на меті, з одного боку, встановити кореляції між частотними характеристиками сигналів АЕ та фізичними процесами в металі, що викликають їх генерування, наприклад, рух дислокацій, поширення тріщини, фазові перетворення, двійникування тощо. З іншого - потрібно було встановити спектральні особливості шумів (як акустичних, так і електричних) та сигналів від акустичних хвиль, що поширювались металом корпусу реактора від джерел, які знаходяться ззовні. Саме така інформація необхідна для ефективного виокремлення інформативної складової сигналу АЕ. Дослідження широкосмугових спектральних характеристик АЕ сигналів проводили, зокрема, в лабораторних умовах під час динамічного розтягування зразків, виготовлених з корпусної реакторної сталі А533В, якій притаманні високі пластичність та в'язкість руйнування.

У спектрах сигналів (у діапазоні 0...2 МГц) виділяли три складові: корисну акустико-емісійну; електричні шуми, що подаються на вхід системи переважно від попереднього підсилювача, та складову, утворену первинним перетворювачем від акустичного білого шуму. Спектр корисного АЕ сигналу, зареєстрованого під час розтягування зразка перед утворенням шийки, мав два розмиті максимуми з резонансами біля 400 та 800 кГц. Із утворенням шийки значно посилюється низькочастотна складова. Тоді спостерігається два типи сигналів – один, що за характером спектру подібний до акустичних шумів, та інший, для якого інтенсивність низькочастотних складових швидко згасає із частотою. При цьому жодних значущих складових для частот, вищих від 150 кГц, не спостерігається. Таким чином, було встановлено, що поширення тріщини під час кінцевої фази руйнування відображається низькочастотними сигналами АЕ, тоді як високочастотні – відображають пластичне деформування, себто колективний рух дислокацій. Дослідження сигналів АЕ на зразках різної геометрії виявили, що характер спектру відтворюється для високочастотної області, тоді як лише у низькочастотній ділянці він залежить від розмірів зразка, відображаючи, таким чином, його резонансні характеристики [55].

Для підтвердження сформульованих висновків щодо спектральних особливостей сигналів АЕ під час руйнування сталі А533В були проведені натурні випробування на корпусі експериментального реактора EBOR, який піддавали втомним навантаженням. Відзначено, що тривалість сигналів АЕ зменшилась на кілька порядків – із кількох мілісекунд до 10...20 мкс. Щодо спектральних особливостей, то для товстостінного (150 мм) корпусу практично зникла низькочастотна складова сигналу, яка для лабораторних зразків посилювалась резонансами в діапазоні 0...150 кГц. У той же час високочастотна складова сигналів АЕ, що відображають рух площин ковзання перед вершиною тріщини, була дуже виразною і мала подібну форму до спектрів сигналів, записаних в умовах лабораторних випробувань.

У 1970-х роках методом АЕ зацікавились практично у всіх країнах, де працювали чи споруджувалися атомні електростанції. Зокрема, в Японії вже у 1969 р. розпочато фундаментальне вивчення явища АЕ зі специфічним ухилом до перевірки зварних з'єднань, якість яких є особливо важливою для корпусів ядерних реакторів. Із лабораторій компанії «Nippon Steel» дослідження методу АЕ у 1972 р. поширились у спеціальний інженерно-технологічний промисловий центр. Для цього було створено 28-ми- та 32-канальні АЕ-системи, отримані дані від яких обпрацьовував комп'ютер [9, 10]. Відпрацювання методики АЕ-діагностування здійснювали на модельному корпусі ємності, виготовленої з низьковуглецевої сталі. Діаметр ємності 1,5 м, довжина 4,8 м, товщина стінки 22 мм. Ємність була покрита з середини 3-міліметровим шаром хромистої корозійностійкої сталі. Зварні шви містили 15 дефектів як із зовнішньої, так і з внутрішньої поверхні. Ці дефекти перед гідростатичними випробуваннями та після них перевірялись радіографічним, ультразвуковим та магнітопорошковим методами. Гідростатичне навантаження корпусу здійснювали до тиску 8,5 МПа, що призвело до суттєвої пластичної деформації металу, але не до втрати герметичності. При цьому записували сигнали АЕ, використовуючи мобільну 32-канальну АЕ-систему. Встановили, що розвиток тріщин від дефектів зварних швів зумовлює виразні сигнали АЕ, параметри яких залежать від величини підростання. Згодом подібні випробування провели на ємності меншого розміру, в якій у результаті надмірного тиску утворилась наскрізна тріщина в'язкого характеру. Встановили, що АЕ-система була

## - НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

нечутливою до виявлення пластичного деформування і критичного звуження металу, що зумовило його в'язке руйнування. У цих дослідах коефіцієнт згасання акустичних сигналів становив 24 дБ/м. Автори дослідження стверджують, що за допомогою наявної АЕ-системи виявити розвиток в'язкого руйнування у пластичній низьковуглецевій сталі корпусу дуже важко. У той же час тріщиноподібні дефекти, які внаслідок прикладених напружень суттєво збільшуються, зумовлюють численні сигнали АЕ значних амплітуд. В цьому випадку метод АЕ є ефективним. До кінця 1970-х років використання методу АЕ у виробничих лабораторіях Японії, де займалися цілісністю та безпекою експлуатації корпусів ядерних реакторів, набуло масового характеру [64].

На зламі 1970-1980-х років метод АЕ продовжує стрімко розвиватися [64-70]. Компанія «Westinghouse» вдосконалює АЕ-обладнання, призначене для моніторингу корпусів ядерних реакторів, і одночасно в лабораторному режимі вивчає особливості генерування пружних хвиль під час руйнування корпусних реакторних сталей, порівнюючи їх вихідний та радіаційно-окрихчений стани. Наприклад, використовували розроблену тут систему для кількісної оцінки тріщиноутворення на компактних зразках, виготовлених із корпусної марганцево-молібдено-нікелевої сталі А533В класу 1 у вихідному стані та після її радіаційного опромінення. Встановлено, що розмір пластифікованої перед вершиною тріщини зони суттєво залежить від рівня опромінення, а коефіцієнт інтенсивності напружень пов'язаний з сумарним рахунком АЕ степеневою залежністю.

У колишньому СРСР АЕ дослідження корпусних реакторних сталей розпочато більш ніж 30 років тому [71, 72]. Їх впровадження, зазначають автори праці [72], не мало успіху через відсутність метрологічних основ застосування методу, не кажучи вже про серійне обладнання. Дослідники Інституту атомної енергії ім. Курчатова провели великий обсяг робіт щодо вивчення залежностей сигналів АЕ від параметрів руйнування для корпусних реакторних сталей типу 15Х2МФА. Лабораторні дослідження АЕ під час динамічного розтягу сталі 15Х2МФА показали, що максимальна емісійна активність спостерігається в умовах досягнення металом межі плинності. Під час випробувань цієї ж сталі на малоциклову втому залежність інтенсивності сигналів АЕ від кількості циклів виявляє певну закономірність із стрімким зростанням цього параметру, як і сумарного рахунку АЕ, під час останньої стадії руйнування (кількість циклів 200-240). Оскільки ефект Кайзера за умов фіксованих параметрів циклу майже не виявлявся, розглядали інші від сколу механізми руйнування: накопичення пластичної деформації

перед вершиною тріщини; стрибкоподібне підростання втомної тріщини із динамічним розвантаженням прилеглих ділянок матеріалу; взаємне тертя берегів втомної тріщини. Останнє спричиняє АЕ активність не тільки за умов стискальних напружень, але й через несумісність берегів тріщини, що містить пластифіковані об'єми металу. У цьому випадку сигнали АЕ генеруються навіть у часових інтервалах, коли тріщина не росте. Це не суттєво, коли потрібно з'ясувати розташування тріщини, але створює проблеми виділення сигналів, що генеруються від підростання тріщини, та значно ускладнює їх кількісну оцінку [72]. Загалом результати цих досліджень підтвердили закономірності, встановлені в описаних вище працях.

Первые акустико-эмиссионные (АЭ) измерительные системы производственного образца и установленные корреляции между параметрами сигналов АЭ и показателями развития разрушения были созданы во второй половине XX века. Именно это и стало основанием заинтересованности разработчиков атомных энергетических технологий и эксплуатационников этим новым методом, который впоследствии станет эффективным дополнением к существующим технологиям неразрушающего контроля для выявления и мониторинга дефектов корпусов ядерных реакторов. Поскольку к таким объектам предъявлены исключительно высокие требования к качеству и целостности, то уже в коние 1970-х годов были направлены значительные усилия на развитие метода АЭ и внедрение его в производство. Практическая реализация средств и методик АЭ-мониторинга и диагностирования состояния корпусов реакторов АЭС подтвердили высокую эффективность метода, хотя в начале их становления были различные утверждения по этому поводу.

- Prognostics and health management in nuclear power plants: a review of technologies and applications / J. B. Coble, P. Ramuhalli, L. J. Bond et al. / Report PNNL-21515. – Richland: Pacific Northwest National Laboratory, July 2012. – 124 p.
- Dunegan H. L., Harris D. O., Tatro C. A. Fracture analysis by use of acoustic emission // Engineering Fracture Mechanics. - 1968. - 1. - P. 105-122.
- 3. *Dunegan H., Harris D.* Acoustic emission a new nondestructive testing tool // Ultrasonics. –1969. 7. P. 160–166.
- Harris D. O., Tetelman A. S., Darwish F. A. Detection of fiber cracking by acoustic emission // Acoustic Emission, ASTM STP 505. – Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials, 1972. – P. 238–249.
- Bently P. G. A review of acoustic emission for pressurised water reactor applications // NDT International. – 1981. – 14. – P. 329–335.
- 6. *Liptai R. G., Tatro C. A.* Acoustic emission technique in nondestructive testing / preprint № UCRL-74549: submitted to the Proc. of the 7th Intern. conf. on Nondestructive Testing; Warsaw, May 28 June 1, 1973. Lawrence Livermore Laboratory of the University of California, 1973. 10 p.
- 7. Acoustic emission test on a 25 mm thick mild steel pressure vessel with inserted defects / P. G. Bentley, D. G. Dawson,

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ-

D. J. Hanley, N. Kirby // Proc. of the 3rd conf. on Periodic inspection of pressurized components, London, Sept. 20–22, 1976. – London: The Institution of Mechanical Engineers, 1976. – P. 113–124.

- Watanabe T., Hashirizaki S., Arita H. A method of evaluating the harmfulness of flaws in structures using AE techniques // Proc. of the 4-th Acoustic Emission Symposium, Tokyo, Japan, Sept. 18–20, 1978. – Tokyo, 1978. – P. 5.59–5.69.
- 9. *Watanabe T.* Inspection of large pressure vessels by acoustic emission technique // Welding and Metal Fabrication. 1975. **43**. P. 525–527.
- Watanabe T., Hashirizaki S., Arita H. Acoustic-emission inspection during water-pressure testing of pressure vessels // NDT International. – 1976. – 9. – P. 227–232.
- Hutton P. H. Detecting acoustic emission in the presence of hydraulic noise // Non-Destructive Testing. – 1969. – 2. – P. 111–115.
- Hutton P. H. Acoustic emission in metals as an NDT tool // Materials Evaluation. – 1968. – 26, № 7. – P. 125–129.
- Hutton P. H. Acoustic emission applied outside of the laboratory // Acoustic Emission, ASTM STP 505. – Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1972. – P. 114–128.
- Green A. T. Detection of incipient failures in pressure vessels by stress-wave emissions // Nuclear Safety. – 1969. – 10, №1. – P. 4–18.
- Use of acoustic emission for the detection of weld and stress corrosion cracking / C. E. Hartbower, W. G. Reuter, C. F. Morais, P. P. Crimmins // Acoustic Emission, ASTM STP505. – Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1972. – P. 187–221.
- Harris D. O., Dunegan H. L. Acoustic emission 5. Application of acoustic emission to industrial problems // Non-Destructive Testing. – 1974. – 7. – P. 137–144.
- 17. Engle R. B., Dunegan H. Acoustic emission: stress wave detection as a tool for nondestructive testing and material evaluation, Lawrence Livermore Laboratory Rept. № UCRL-71267 [submitted to 8th Symposium on Physics and Nondestructive Testing, Schiller Park, IL, Sept. 24–26, 1968]. 28 p.
- Dunegan H. L., Harris D. O., Tetelman A. S. Detection of fatigue crack growth by acoustic emission techniques // Materials Evaluation. – 1970. – 28, № 10. – P. 221–227.
- Harris D. O., Dunegan H. L. Continuous monitoring of fatigue crack growth by acoustic emission techniques // Experimental Mechanics. – 1974. – 11. – P. 71–81.
- Ying S. P., Hamlin D. R., Whiting A. R. Acoustic emission from welds, ceramic materials, and radiation effect of the emission from nuclear reactor steel // Proc. of the 9th Symposium on Non-destructive evaluation; Apr. 25–27, 1973, San Antonio, TX. – San Antonio, TX: ASNT and SWRI, 1973. – P. 217–223.
- Ying S. P. Characteristics and mechanisms of acoustic emission from solids under applied stress // Critical Reviews in Solid State Science. – 1973. – 4. – P. 85–123.
- Ying S. P., Grigory S. C. Acoustic emission from flawed heavy section steel plates // Materials Evaluation. – 1975. – 33. – P. 30–36.
- Ying S. P. Effect of crack size on acoustic emission related to moving dislocations // J. of Applied Physics. – 1975. – 46, № 2882. – 7 p.
- 24. *Ying S. P.* The use of acoustic emission for assessing the integrity of a nuclear reactor pressure vessel // NDT International. 1979. **12.** P. 175–179.
- Palmer I. G. The application of acoustic emission measurements to fracture mechanics // Materials Sci. and Engin. – 1973. – 11. – P. 181–184.
- Palmer I. G. Acoustic emission measurements on reactor pressure vessel steel // Ibid. – 1973. – 11. – P. 227–236.
- Palmer I. G. The relationship between acoustic emission and crack opening displacement measurements // Ibid. – 1974. – 14. – P. 3–6.
- Lindley T. C., Palmer I. G., Richards C. E. Acoustic emission monitoring of fatigue crack growth // Ibid. – 1978. – 32. – P. 1–15.

- Parry D. L. Nondestructive flaw detection by use of acoustic emissions // Technical Report IDO-17230, Atomic Energy Division of Phillips Petroleum Co., Idaho Falls, 1967. - 44 p.
- Parry D. L. Incipient failure detection by acoustic emissions: A development and status report // Techn. Report № IN– 1398. – Idaho Falls: Idaho Nuclear Corp, 1970. – 111 p.
- Parry D. L. Nondestructive flaw detection in nuclear power installations // Transactions of the American Nuclear Sociaty. - 1967. - 10. - P. 107-126.
- 32. *Parry D. L., Robinson D. L.* Incipient failure detection by acoustic emission. A development and status report. Idaho Falls: Idaho Nuclear Corp., 1970. 102 p.
- Waite E. V., Parry D. L. Field evaluation of heavy-walled pressure vessels using acoustic emission analysis // Materials Evaluation. – 1971. – 29, № 6. – P. 117–124.
- 34. *Pollock A. A.* Stress-wave emission in ndt // Non-Destructive Testing. 1969 2. P. 178–182.
- Pollock. A. A. Stress-wave emission a new tool for industry // Ultrasonics. – 1968. – 6, № 2. – P. 88–92.
- Sinclair A. C., Connors D. C., Formby E. C. L. Acoustic emission analysis during fatigue crack growth in steel // Materials Sci. and Engin. – 1977. – 28. – P. 263–273.
- 37. Sinclair A. C. E., Formby C. L., Connors D. C. Acoustic emission from a defective C/Mn steel pressure vessel // Intern. Journal of Pressure Vessels and Piping. – 1975. – 3, № 3 – P. 153–174.
- Fujimura T., Kamata Y., Nakanii T. Applicability of AE method to nuclear reactor vessel // Proc. of the Japan–U.S. joint symposium on Acoustic emission and its applications to structural safety; July 4–6, 1972, Tokyo / High Pressure Institute of Japan and Japan Society for Non Destructive Inspection. – Tokyo: Japan Industrial Planning Association, 1972. – P. 90–104.
- 39. Gopal R. On-line acoustic emission monitoring systems for nuclear power plants // Proc. of the Japan–U.S. joint symposium on Acoustic emission and its applications to structural safety; July 4–6, 1972, Tokyo / High Pressure Institute of Japan and Japan Society for Non Destructive Inspection. – Tokyo: Japan Industrial Planning Association, 1972. – P. 273–274.
- Report on the integrity of reactor vessels for light water power reactors. The Advisory Committee on Reactor Safeguards // Nuclear Engineering and Design. – 1974. – 28. – P. 147–195.
- Drouillard T. E. Acoustic emission the first half century // Proc. of the 12th Intern. Acoustic emission symposium "Progress in Acoustic Emission", Sapporo / The Japanese Society for NDE. – 1974, VII. – P. 27–38.
- Frederick J. R. Acoustic emission as a technique for nondestructive testing // Materials Evaluation. - 1970. - 28, № 2. - P. 43-47.
- Jolly W. D. The application of acoustic emission to in-process inspection of welds // Ibid. – 1970. – 28, № 6. – P. 135–139.
- Vetrano J. B., Jolly W. D. In service acoustic emission monitoring of reactor pressure vessels // Ibid. – 1972. – 30, № 1. – P. 9–12.
- Nichols R. W., Cowan A. The prevention of fracture initiation in reactor structural material // Nuclear Engineering and Design. – 1972. – 20. – P. 287–302.
- 46. *Kelly M. P., Bell R. L.* Detection and location of flaw growth in the EBOR nuclear reactor vessels // Report № DE 73–4. – Dunegan Corp, 1973. – 16 p.
- Bell R. L., Kelly M. P., Dunegan H. L. Acoustic emission monitoring of proof tests simulated in-service nuclear pressure // Transactions of the American Nuclear Society. – 1973. – 16. – P. 85–86.
- Romrell D. M. Acoustic emission weld monitoring of nuclear components // Weld Journal. – 1973. – 52, № 2. – P. 81–87.
- Chretien N., Bernard P., Barrachin B. Inspection of steel pressure vessels by acoustic emission // Proc. of the 2nd Intern. conf. on Pressure vessel technology, 1–4 Oct. 1973, San Antonio, TX. – New York: American Soc. Mech. Eng, 1973. – P. 655–667.

- НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

- Bell R. L. A progress report on the use of acoustic emission to detect incipient failure in nuclear pressure vessels // Nuclear Safety. – 1974. – 15. – P. 554–571.
- Bentley P. G., Dawson D. J., Parker J. A. Instrumentation for acoustiuc emission testing of steel pressure vessels // Proc. of the 2nd Acoustic emission symposium, Tokyo, September 2–4, 1974. – Tokyo: Japan Industrial Planning Association, 1974. – P. 3-1–3-29.
- Ingham T., Stott A. L., Cowan A. Acoustic emission characteristics of steels part 1: Acoustic measurements from tensile tests // Intern. Journal of Pressure Vessels and Piping. - 1974. - 2. - P. 31-50.
- Ingham T., Stott A. L., Cowan A. Acoustic emission characteristics of steels part 2: Acoustic measurements from fracture toughness tests // Ibid. – 1975. – 3. – P. 267–293.
- 54. Ingham T., Dawson D. G. Application of acoustic emission measurements on laboratory testpieces to large scale pressure vessel monitoring // Transactions of the 3rd Intern. conf. on Structural mechanics in reactor technology – SMiRT-3, 1–5 Sept. 1975 / Ed. by T.A. Jaeger; International Association on Structural Mechanics in Reactor Techologies and British Nuclear Energy Society. – London: North-Holland, 1975. – **3**. – 14 p.
- 55. Graham L. J., Alers G. A. Acoustic emission in the frequency domain // Monitoring structural integrity by acoustic emission / Ed. by J. C. Spanner, J.W. McElroy. – ASTM STP 571. – Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials, 1975. – P. 11–39.
- Gopal R. Acoustic monitoring systems to assure integrity of nuclear plants / R. Gopal // Monitoring structural integrity by acoustic emission / Ed. by J. C. Spanner, J.W. McElroy. – ASTM STP 571. – Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials, 1975. – P. 200–220.
- Gopal R., Smith L. R., Rao G. V. Experience in acoustic monitoring of pressurized water reactor // Proc. of the 3rd conf. on Periodic inspection of pressurized components; Sept. 20–22, 1976; London. – London: The Institution of Mechanical Engineers, 1976. – P. 1–12.
- Preliminary investigations of on-line AE monitoring system for nuclear power plant / N. Uesugi, K. Tatsuno, K. Uchida, T. Miyazawa // Proc. of the 3rd Acoustic emission symposium. – Tokyo: Japan Industrial Planning Association, 1976. – P. 167–181.
- Hatano H., Ono K. Acoustic emission during fracturetoughness tests of a nuclear pressure vessel steel and its weldments // Proc. of the 3rd Acoustic emission symposium. – Tokyo: Japan Industrial Planning Association, 1976. – P. 475–491.
- Clark G., Knott J. F. Acoustic emission and ductile crack growth in pressure-vessel steels // Metal Science. – 1977. – 11. – P. 531–536.

- Crawford A. H. Non-destructive testing of nuclear power reactor components // Non-Destructive Testing. – 1970. – 3. – P. 217–219.
- Conference reports: Acoustic emission meeting, London, 14 March // Non-Destructive Testing. – 1972 – 5. – P. 177–178.
- Kelly M. P., Schlamp R. J. Detecting structural degradation by acoustic emission // Proc. of the 25th meeting of the Mechanical Failures Prevention Group, November 3–5, 1976, Gaithersburg / Ed. by T. R. Shives, W. A. Willard. – SP 487. – Gaithersburg: NBS, 1977. – P. 210–238.
- Ando Y. Research on structural integrity of pressure boundary in light water reactor designs // Nuclear Engineering and Design. – 1978. – 48. – P. 135–147.
- Acoustic emission analysis of SUS 304 from fatigue crack under cyclic loading / T. Nagata, Y. Sakakibara, Y. Mori, T. Kishi // Proc. of the 4th Intern. Acoustic emission symposium / Japanese Society for Non Destructive Evaluation. – Tokyo, 1978. – P. 3-45–3-59.
- 66. Acoustic emission analysis for evaluation of critical faults in welded structures of an austenitic nuclear pressure vessel steel / T. Fiuscher, K. Seifert, H. D. Kunze, K. Wolitz // Proc. of the 4th Intern. Acoustic emission symposium / Japanese Society for Non Destructive Evaluation. – Tokyo, 1978. – P. 4-22–4-32.
- Jolly W. D. Investigation of flaw and thermal shock in heavy section steel structures with acoustic emission // Proc. of the 4th Intern. Acoustic emission symposium / Japanese Society for Non Destructive Evaluation. – Tokyo, 1978. – P. 4-46–4-53.
- Rao G. V., Gopal R. Flaw growth characterization studies of irradiated pressure vessel steel by acoustic monitoring technique // Transactions of the American Nuclear Society. - 1980. - 34. - P. 188-189.
- Iwasaki H. Acoustic emission and fracture patterns of SUS– 304 and A533B materials // Proc. of the 5th Intern. Acoustic emission symposium / Japanese Society for Non Destructive Evaluation. – Tokyo, 1980. – P. 209–220.
- Acoustic emission characteristics of type 304 stainless steel during fatigue crack propagation / Y. Mori, Y. Sahakibara, T. Nagata et al. // Proc. of the 5th Intern. Acoustic emission symposium / Japanese Society for Non Destructive Evaluation. – Tokyo, 1980. – P. 465–474.
- Баранов В. М., Молодиов К. И. Акустико-эмиссионные приборы ядерной энергетики. – М.: Атомиздат, 1980. – 142 с.
- 72. Акустическая эмиссия и ее применение для неразрушающего контроля в ядерной энергетике / В. И. Артюхов, К. Б. Вакар, В. И. Макаров и др. // Под ред. К. Б. Вакара. М.: Атомиздат. 1980. 216 с.

First acoustic-emission (AE) measuring systems of production type were developed and correlations between parameters of AE signals and fracture propagation indices were established in the second half of the XXth century. This is exactly what aroused the interest of developers of nuclear power engineering technologies and operators in this new method, which later on will become an effective addition to the currently available technologies of nondestructive testing (NDT) for detection and monitoring of defects in nuclear reactor bodies. As extremely high requirements of quality and integrity are made of such facilities, considerable efforts were aimed at development of AE method and its introduction into industry already at the end of 1970ties. Practical implementation of the methods and procedures of AE monitoring and diagnostics of the condition of NPP reactor bodies confirmed the high effectiveness of the method, although at the beginning of their introduction into industry different opinions were expressed on this subject.

K e y w o r d s : acoustic emission, fracture propagation indices, nuclear power engineering technologies

Надійшла до редакціі 10.07.2014

# ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛИ 12Х18Н10Т ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ 560 °С Сообщение 2. Повреждаемость и прогноз разрушения\*

#### С. А. НЕДОСЕКА, А. Я. НЕДОСЕКА, А. А. ГРУЗД

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

Изучены акустико-эмиссионные (АЭ) характеристики широко используемой в промышленности стали 12X18H10T в условиях нормальных и высоких (до 560 °C) температур при испытаниях на статическую прочность. Показаны особенности, характерные для процесса накопления повреждений при деформировании и возникновения сопутствующей этому процессу АЭ. Установлено, что для объектов из стали 12X18H10T при высоких температурах (до 560 °C) возможна эффективная оценка накопления повреждений и прогнозирование разрушения с использованием метода АЭ. Библиогр. 5, рис. 7, табл. 2

Ключевые слова: акустическая эмиссия, статическая прочность, оценка накопления повреждений, прогнозирование развития разрушений

Исследования в лабораторных условиях акустико-эмиссионных (АЭ) характеристик материалов при высоких температурах требуются для оценки состояния материалов при периодическом и непрерывном АЭ мониторинге потенциально опасных объектов промышленности (в первую очередь химических производств) при АЭ контроле процессов сварки и плавки.

В Сообщении 1 (см. сноску) рассмотрены результаты испытаний на статическую прочность стали 12X18Н10Т в условиях нормальных и высоких температур [1]. Описан разработанный стенд (рис. 1) для высокотемпературных АЭ испытаний образцов (рис. 2) на основе машины Р-20 и диагностической аппаратуры ЕМА-3. Методика проведения испытаний предусматривала отработку и изготовление специализированных образцов, предназначенных для нагрева, статическое растяжение их до момента разрушения, измерение и запись акустических характеристик исследуемого материала. Был обеспечен комплексный и синхронный контроль параметров, необходимых для получения и анализа высокотемпературных АЭ характеристик испытуемого материала при температурах до 560 °С.

При испытаниях на статическое растяжение регистрировали температуру в рабочей части образца, нагрузку и АЭ, а также проверяли алгоритм прогноза разрушающей нагрузки АЭ системы ЕМА-3 в условиях различной акустической активности.

Полученные результаты испытаний стали 12X18H10T в условиях нормальных и высоких

температур показали особенности, характерные для процесса ее деформирования и разрушения, возникновения сопутствующей этому процессу АЭ. В частности, количественные параметры сигналов АЭ, регистрируемые для разных образцов в аналогичных температурно-силовых условиях нагружения, существенно отличаются и не могут быть однозначно истолкованы при описании процесса накопления повреждений и разрушения. Кроме того, результаты испытаний образцов без концентратора при нормальной температуре показывают крайне незначительную активность АЭ на протяжении всего процесса нагружения.

Испытания образцов с концентраторами (выточкой и сварным швом) показали наличие достаточно большого, по сравнению с гладким образцом, числа событий АЭ. Хотя картина распределения сигналов во времени и их численные характеристики для одинаковых образцов существенно отличаются, полученного объема АЭ данных оказалось достаточно для прогнозирования развития разрушения.

Важным положительным результатом проведенного исследования явилась успешная проверка работоспособности алгоритмов прогнозирования разрушающей нагрузки, выполняемого программой ЕМА-3.5, в условиях высоких температур до 560 °С.

Используемая модификация системы EMA-3 с программным обеспечением EMA-3.5 позволяют получать в процессе испытаний как прогнозные данные по предполагаемому разрушению, так и

<sup>&</sup>lt;sup>\*</sup> Исследование акустико-эмиссионных характеристик стали 12Х18Н10Т при температуре 560 °С. Сообщение 1. Методика и некоторые результаты / С. А. Недосека, А. Я. Недосека, А. А. Грузд, М. А. Яременко, Л. Ф. Харченко // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2011. – № 1. – С. 13–19.

<sup>©</sup> С. А. Недосека, А. Я. Недосека, А. А. Грузд, 2014

- НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ



выводить на экран и в таблицы значения текущей оценочной поврежденности материала, для которой прогноз был выполнен.

В данной серии экспериментов точность определения текущей поврежденности и прогноза разрушающей нагрузки была несколько ниже, чем при испытаниях стандартных образцов в условиях нормальных температур, но соответствовала требуемому Госпотребстандарта Украины для систем EMA-3 диапазону погрешностей ± 15 % (рис. 3).

Учитывая, что наиболее представительными с точки зрения акустической активности являются результаты испытаний образцов со сварными соединениями (например, рис. 4), интересно проанализировать, как АЭ отображает накопление повреждений в образцах такого типа при высокотемпературных испытаниях.

Алгоритм расчета поврежденности и прогноза разрушения [2] системы ЕМА-3 построен на математической модели, которая обновляет результаты расчета по мере накопления данных АЭ. На рис. 5, *а* показан участок кривой нагружения при испытании того же сварного образца, что и на рис. 4, только в тех характерных точках, в которых система проводила расчет поврежденности материала по результатам накопленной за



Рис. 1. Стенд для высокотемпературных испытаний образцов на основе машины Р-20 (*a*) и фрагмент установки с образцом круглого сечения в электропечи (б): 1 – система нагружения образца машины Р-20; 2 – верхняя и нижняя траверсы; 3 – высокотемпературная печь; 4 – переходник для составного захвата; 5 – датчик АЭ; 6 – волновод; 7 – термопара



Рис. 2. Круглый образец с головкой диаметром 14 мм и надрезом-концентратором в рабочей части

人 НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ



*Рис. 3.* Окно прогноза программы ЕМА-3.5 при высокотемпературных испытаниях двух различных образцов стали 12X18H10T с концентраторами: *а* – предупреждение 2-го уровня, погрешность прогноза составляет ± 15 %; *б* – предупреждение 3-го уровня, погрешность прогноза ± 10 %



Рис. 4. Результаты испытаний одного из образцов со сварным швом при температуре 560 °С (столбчатый график – амплитуды событий АЭ (*A*); линейный – нагрузка (*P*)

этот период времени информации об акустической активности. Как видим, первые импульсы дискретной АЭ появились на 38-й секунде нагружения, а начиная с 54-й количества АЭ информации, полученной системой, стало достаточно для выполнения расчета поврежденности и прогноза разрушения. На рис. 5, б показаны расчетные значения поврежденности, полученные системой. Поврежденность [3] в контексте данного исследования – безразмерная величина, выраженная в процентах. Значению 100 % соответствует такое состояние материала, при котором он считается полностью утратившим свои эксплуатационные свойства и не способным сопротивляться воздействию нагрузок [4].

Перестроив графики, приведенные на рис. 5, в общих координатах, получим наглядное представление о процессе накопления повреждений в данном эксперименте (рис. 6). Отметим, что данный способ представления результатов является удачным, поскольку полученная кривая, в отличие от приведенных на рис. 5, плавная и может быть при необходимости легко описана элементарными функциями. Необходимость такого описания возникает, как правило, при переходе к расчету остаточного ресурса по известной поврежденности, что в свое время было выполнено



*Рис. 5.* Кривая нагружения сварного образца на участке расчета поврежденности (a) и расчетная поврежденность ( $\delta$ )

для материалов труб магистральных газопроводов [5].

В дополнение к сказанному выше интересно проанализировать не только сами результаты прогноза разрушающей нагрузки, но и изменение прогнозных данных в процессе нагружения образцов. На примере результатов испытания одного из образцов, приведенных в табл. 1, видно, что система корректировала прогнозное значение разрушающей нагрузки четыре раза.

При этом наиболее точные значения прогноза получены в первоначальный момент, при генерации системой первого предупреждения об опас-



Рис. 6. Накопление повреждений в сварном образце с увеличением нагрузки

Номер п/п	Время, с	Событие АЭ	Текущее значение нагрузки, кН	% от разрушаю- щей нагрузки	Уровень предупреж- дения об опасности	Прогноз- минимум, кН	Прогноз- максимум, кН
1	127	15	24,76	55	1	41,27	49,53
2	131	17	25,19	56	2	36,02	53,23
3	136	18	26,23	58	3	34,09	39,34
4	195	22	38,73	86	3	38,34	48,41
Примечание. Реальное разрушение произошло при 45,02 кН.							

Таблица 1. Результаты прогноза разрушения одного из образцов с концентратором

ности (55 % разрушающей нагрузки), и в момент, когда уже после генерации третьего предупреждения (86 % разрушающей нагрузки) значение прогноза было последний раз скорректировано. Представленный результат хорошо иллюстрируется графически (рис. 7). Наиболее интересным является то, что несмотря на изменения в значениях прогноза на разных этапах нагружения (показаны пунктиром), линии тренда, проведенные для минимальных и максимальных значений прогноза (показаны штрих-пунктиром), фактически параллельны оси абсцисс и четко показывают, что реальная разрушающая нагрузка лежит в заданном диапазоне прогнозных величин.



Рис. 7. Корректировка системой ЕМА-3 данных прогноза разрушения в процессе испытания образца с концентратором: 1 – нагрузка на образец; 2 – нагрузка, при которой разрушился образец; 3, 4 – нижнее и верхнее значение прогнозной разрушающей нагрузки; 5, 6 – линии тренда, построенные для кривых 3 и 4 соответственно

Аналогичная ситуация наблюдается и для остальных образцов, данные для некоторых из них сведены в табл. 2. Прогнозные значения разрушающей нагрузки попадают в требуемый сертификатом Госпотребстандарта Украины на системы ЕМА-3 диапазон погрешностей ± 15 %, что свидетельствует о принципиальной возможности прогнозирования разрушения данного материала при температурах до 560 °С при условии наличия концентраторов напряжений.

Очевидно, что при в целом положительных результатах прогноза алгоритм прогнозирования разрушения при высоких температурах работает с худшей точностью, чем при нормальных. Это можно заметить, в частности, для данных табл. 1 и для двух приведенных в табл. 2 образцов, где результаты прогноза занижены даже по верхнему пределу.

Для обеспечения работоспособности материала и своевременного предупреждения об опасности это является приемлемым, поскольку дает дополнительный запас надежности и время для принятия решения. Тем не менее, желательным был бы набор дальнейших статистических данных по высокотемпературным АЭ свойствам данной стали и соответствующая коррекция параметров прогноза или, при необходимости, самого алгоритма применительно к АЭ испытаниям в условиях высоких температур как в лабораторных, так и в промышленных условиях.

В целом же результаты проведенного исследования можно охарактеризовать как положительные, поскольку полученные данные подтвердили работоспособность для данной стали алгоритмов прогноза системы EMA-3 в условиях высоких температур, возможность отслеживать повреждаемость материала в процессе эксплуатации и своевременно предупреждать о наступлении его опасного состояния.

Таблица 2. Результаты прогноза разрушения для некоторых образцов с концентратором, кН

Номер	Разрушающая	Первоначальный	Первоначальный	Окончательный	Окончательный
п/п	нагрузка	прогноз-минимум	прогноз-максимум	прогноз-минимум	прогноз-максимум
1	45,02	41,27	49,53	38,34	48,41
2	49,47	40,36	48,43	40,36	48,43
3	42,21	53,92	62,22	34,3	43,31
4	47,21	28,77	43,53	36,17	45,93

# НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

#### Выводы

Модернизированный испытательный стенд, выбранные образцы и методика испытаний обеспечивают получение АЭ данных, необходимых для прогнозирования состояния образцов из стали 12X18H10T, работающих при высоких температурах (до 560 °C).

Эффективным способом анализа результатов проведенных испытаний представляется их графическая интерпретация в координатах «нагрузка – поврежденность», которая позволяет описать указанную зависимость плавной кривой.

Система ЕМА-3 выполняет для стали 12Х18Н10Т прогноз разрушающей нагрузки по данным АЭ при температурах до 560 °С, но его точность зависит от объема получаемой АЭ информации. Это вполне соответствует необходимости прогнозирования состояния наиболее поврежденных, а следовательно, и наиболее АЭ активных участков конструкций, но требует дальнейших исследований по возможности прогнозирования состояния неповрежденных участков.

- 1. Исследование акустико-эмиссионных характеристик стали 12Х18Н10Т при температуре 560 °С. Сообщение 1. Методика и некоторые результаты / А. Я Недосека, С. А. Недосека, А. А. Грузд и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. 2011. № 1. С. 13–19.
- 2. *Недосека С. А.* Прогноз разрушения по данным акустической эмиссии // Там же. 2007. № 2. С. 3–9.
- Модель накопления повреждений в металлических материалах при статическом растяжении / А. А. Лебедев, Н. Г. Чаусов, С. А. Недосека, И. О. Богинич / Пробл. прочности. 1995. № 7. С. 31–40.
- Комплексная оценка поврежденности материала при пластическом деформировании / А. А. Лебедев, Н. Г. Чаусов, И. О. Богинич, С. А. Недосека // Там же. – 1996. – № 5. – С. 23–30.
- 5. Недосека С. А., Недосека А. Я. Комплексная оценка поврежденности и остаточного ресурса металлов с эксплуатационной наработкой // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2010. – № 1. – С. 9–16.

Acoustic-emission (AE) characteristics of 12Kh18N10T steel widely applied in industry under the conditions of normal and high (up to 560 C) temperatures at static strength testing were studied. Features characteristic of the process of damage accumulation at deformation and initiation of AE accompanying this process are shown. It is established that for objects from 12Kh18N10T steel at high temperatures (up to 560 C) effective evaluation of damage accumulation and fracture prediction with application of AE method is possible. 5 References, 7 Figures, 2 Tables.

Keywords: acoustic emission, static strength; assessment of damage accumulation, prediction of fracture propagation

Поступила в редакцию 09.10.2012

## НОВА КНИГА



# Назарчук З. Т., Андрейків О. Є., Скальський В. Р.

Оцінювання водневої деградації феромагнетиків у магнетному полі. – Київ: Наукова думка, 2013. – 320 с.

Проведено теоретичні дослідження для встановлення взаємозв'язку між об'ємним стрибком стінки домена у феромагнетному матеріалі та величиною зумовленого ним переміщення його поверхні (магнетострикційний ефект). Запропоновано алгоритм оцінки коефіцієнта інтенсивності напружень феромагнетного матеріалу під впливом зовнішнього магнетного поля.

На підставі теоретико-експериментальних досліджень встановлено вплив водневого деградування феромагнетиків на генерування сигналів магнетопружної акустичної емісії. Показано особливості їх генерування за наявності пластичної деформації, структурних змін та об'ємної пошкодженості у таких конструкційних матеріалах.

Приведено результати експериментальних досліджень щодо встановлення зміни залишкової намагнеченості та магнетної в'язкості під впливом деформування та водневого деградування феромагнетиків.

Для наукових працівників та інженерів-дослідників, а також аспірантів і студентів вищих учбових закладів зі спеціальностей: діагностика матеріалів і конструкцій; неруйнівний контроль; фізична акустика; механіка руйнування тощо.

# ДЛИТЕЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ, РАБОТАЮЩИХ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ, ПО ДАННЫМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

#### А. Я. НЕДОСЕКА, С. А. НЕДОСЕКА, Ю. А. СМОГОЛЬ, А. А. КОЗАКОВ

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

Рассмотрены вопросы прогнозирования на основе метода акустической эмиссии (АЭ) разрушающей нагрузки в действующих при высокой температуре трубопроводах тепловых станций. Показано, что прогнозируемая системой непрерывного АЭ мониторинга разрушающая нагрузка с достаточной для практики точностью определяет также и предел длительной прочности материала независимо от времени наработки и рабочей температуры. Для повышения надежности в принятии решения о необходимости остановки и вывода из эксплуатации конструкций по данным АЭ контроля установлены коэффициенты запаса по прогнозируемой разрушающей нагрузке. Учитывая наличие и готовность к применению необходимых аппаратных и программных средств, можно говорить о том, что разработаны соответствующие методика и технология. Библиогр. 16, рис. 4, табл. 1.

#### Ключевые слова: акустическая эмиссия, длительная прочность, разрушающая нагрузка, прогноз, ресурс, коэффициент запаса

Разрушение материалов энергетических установок, работающих в условиях ползучести при высоких температурах, характеризуется возникновением и развитием на границах зерен сначала микротрещин, затем постепенным превращением их в поры с последующим слиянием пор и образованием магистральной трещины, приводящей к разрушению материала [1–8].

На рис. 1 представлен график длительной прочности стали 15Х1М1Ф, наиболее широко применяемой в системах трубопроводов тепловых станций, показывающий, что разрушающие нагрузки уменьшаются с увеличением рабочей температуры и количества отработанного времени.

Исследованиями [1-8] установлено, что при определенном количестве часов наработки возникает смена механизма разрушения материала, клиновидные трещины преобразуются в поры и дальнейшее разрушение происходит путем образования и слияния пор. Этот процесс постепенного накопления повреждений и развития разрушения, являясь в условиях высоких температур доминирующим, сопровождается возникновением АЭ. При испытании материалов в условиях высоких температур с применением метода АЭ было показано, что их деформирование и разрушение вызывает возникновение множественных источников АЭ (рис. 2). Это свидетельствует о том, что образование и слияние пор в процессе разрушения материала при высоких температурах происходит также дискретно, как и при нормальных. Следовательно, методика АЭ контроля может быть использована и при оценке состояния материалов, работающих при высоких температурах [8, 10-12].

На графиках рис. 2: *P* – растягивающая образец нагрузка (синяя кривая); *A* – амплитуда АЭ сигналов, возникающих при разрушении материала (зеленая) и Rt – райс тайм, характеризующий «жесткость» процесса разрушения (розовая). Из графика видно, что с ростом нагрузки интенсивность разрушения материала и его жесткость изменяются в широких пределах, что свидетельствует о явно выраженном дискретном характере разрушения и влиянии на него постоянно возникающего изменяющегося упрочнения материала [13].

На рис. 1 представлены точки перехода от разрушения клиновидными трещинами к разрушению возникающими и развивающимися порами (точки *A* и *Б* на графике). С увеличением рабочей температуры (в данном случае 610 °C) положение точки *A* начала изменения механизма разрушения



*Рис. 1.* Длительная прочность стали  $15X1M1\Phi$  при температурах 540 (1) и 610 °C (2) при различном времени наработки [2, 9]

© А. Я. Недосека, С. А. Недосека, Ю. А. Смоголь, А. А. Козаков, 2014



*Рис. 2.* Испытание на растяжение образца из стали  $15X1M1\Phi$  при температуре 560 (a) и  $20 \degree C (\delta)$ 

смещается в сторону меньшей наработки материала по времени. Эти данные хорошо коррелируют с результатами АЭ испытаний, приведенными на рис. 2. Так, на рис. 2, *а* график, полученный



*Рис. 3.* Гистограмма состояния АЭ активности трубы через 6 ч 22 мин с момента начала контроля. (вверху в таблице представлены величины прогнозируемой разрушающей нагрузки)

при температуре 560 °C, отличается от графика на рис. 2,  $\delta$  более ранним началом появления АЭ по отношению к общему времени испытания, кроме того, большая часть зарегистрированных событий АЭ возникает на ранних стадиях нагружения. Еще одним важным фактором является то, что общее зарегистрированное число событий АЭ при переходе к высоким температурам не снижается, для приведенных результатов обоих испытаний оно равно 105.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что модель накопления повреждений, предложенная в работе [14], и практически реализованная в виде прогнозирующего разрушение материалов программного обеспечения, в частности, для систем АЭ диагностики ЕМА [10–12], может быть



Рис. 4. Условная схема оценки остаточного ресурса

после определенной проверки использована для определения длительной прочности изделий, работающих в условиях высоких температур.

Исследование работоспособности предлагаемой методики определения длительной прочности проводили при контроле трубопроводов горячего промперегрева пара. Материалы трубопроводов сталь 15Х1М1Ф, диаметр трубы 630 мм, толщина стенки 25 мм, и сталь 12X1МФ, труба диаметром 377 мм с толщиной стенки 17 мм. АЭ датчики устанавливали на трубе на расстоянии 20 м друг от друга. Контроль выполнялся при давлении пара в трубе, равном 22 ат, температура пара 542 °C. В процессе испытаний с использованием программы ЕМА-3.9 определяли места повышенной опасности и прогнозировалась разрушающая нагрузка [11, 15]. Испытания проводили в процессе непрерывного мониторинга трубопроводов при штатных режимах работы. Для трех контролируемых участков трубопровода из датчиков АЭ сформировали отдельные локационные антенны, обеспечивающие определение координат источников АЭ в линейном режиме локации. Для поступающей информации, идентифицируемой как события АЭ, предусмотрен кластерный анализ, позволяющий объединять события по координатному и ряду других признаков. При наличии существенного разброса в определенных координатах событий, с высокой вероятностью принадлежащих к одному и тому же процессу в материале, объединение их в кластер позволяет наиболее точно указать место возникновения их источника.

На рис. 3 представлены некоторые элементы окна программы, выполняющей мониторинг, приведена часть трубопровода, контролируемая антенной 2. Показаны датчики, начиная от 8 до 14. Ниже показана условная шкала расстояний от 0 до 100 м. Наибольшая АЭ активность наблюдается между 8 и 12 датчиками. Представленные на схеме столбики отражают места концентрации АЭ событий в каждом контролируемом кластере. Цифры на флажках показывают количество АЭ событий в кластере, цвет флажков указывает на степень опасности протекающего в кластере процесса разрушения. Над схемой кластеров в окне прогнозирования в специальной таблице для трех антенн, контролирующих всю систему трубопроводов, представлена цветом опасность ситуации на определенном участке трубопровода в данный момент времени. Показаны координаты наиболее опасных мест на всем трубопроводе по антеннам 1-3 и прогнозируемые разрушающие давления в этих местах трубопровода (антенна 3 контролирует участок трубопровода из стали 12Х1МФ длиной 20 м диаметром 377 мм с толщиной стенки 17 мм). В нижней части экрана приведены мгновенные значения непрерывной эмиссии, регистрируемой каждым контролирующим АЭ датчиком. Интенсивность эмиссии ранжирована высотой столбца и цветом.

Приведенные в таблице (вверху на рис. 3) значения прогнозируемого разрушающего давления, пересчитанные в напряжения, удовлетворительно соответствуют значениям предела длительной прочности сталей 15Х1М1Ф и 12Х1МФ, полученным для этих материалов при стандартных испытаниях образцов на длительную прочность [9].

В этой же таблице представлена цветом опасность ситуации в трубопроводе на данный момент времени. Для первой и второй антенн показаны координаты 63 и 51 м с наибольшей АЭ активностью. В то же время прогнозируемые разрушающие нагрузки в несколько раз превышают рабочие, что свидетельствует о возможности дальнейшей эксплуатации трубопровода этих ниток (цвет индикатора опасности – желтый). Антенна 3 контролирует участок трубопровода, находящийся в худших условиях по сравнению с 1 и 2 участками. В этом случае на участке трубы на расстоянии примерно 10 м от ее начала прогнозируемая разрушающая нагрузка примерно в два раза превышает рабочую (цвет индикатора для антенны 3 оранжевый), в то время как для участков 1 и 2 прогнозная разрушающая нагрузка превышает рабочую примерно в 4 раза.

Для повышения надежности в принятии решения о необходимости остановки и вывода из эксплуатации конструкций по данным АЭ контроля установлены коэффициенты запаса по прогнозируемой разрушающей нагрузке. При этом, чем большая разница между прогнозируемой и рабочей нагрузкой, тем меньший коэффициент запаса автоматически устанавливает система мониторинга. С уменьшением отношения  $P_{\rm pa6}/P_{\rm npor}$  коэффициент запаса автоматически увеличивается.

Правильность используемого метода прогноза дополнительно подтверждается имеющимися данными по пределу прочности материалов, используемых в трубопроводах, в условиях длительной эксплуатации при высоких температурах. Прогнозируемые разрушающие давления, пересчитанные в напряжения, с достаточной для практики точностью совпадают с величиной предела длительной прочности материала при аналогичных с контролируемым трубопроводом условиях по температуре и сроке наработки материала. Как показано в табл. 1, при 542 °С и наработке 207000 ч совпадение с нормативными значениями предела длительной прочности, особенно с учетом установленных коэффициентов запаса, является удовлетворительным.

Отметим, что данные АЭ, на основе которых выполнен прогноз, получены при штатных условиях эксплуатации. Проведенные исследования не требовали традиционных для кратковременных

### НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ-

Сравнение предела длительной прочности материалов испытанных трубопроводов по полученным результатам прогноза и данным ТУ 14-3-460:2009 (*T* = 542 °C, наработка 207000 ч)

Антенна	Предел длительной прочности	Источник	Коэффициент запаса (сталь)
1,2	113141 МПа на базе 2·10 <sup>5</sup>	ТУ 14-3-460:2009	1,2 (15X1M1Φ)
1,2	98113 МПа на базе 2,07·10 <sup>5</sup>	По данным прогноза	1,2 (15X1M1Φ)
3	5260 МПа на базе 2,07·10 <sup>5</sup>	_"_	1,5 (12X1MФ)
3	7797 МПа на базе 2·10 <sup>5</sup>	ТУ 14-3-460:2009	1,5 (12X1MФ)

АЭ испытаний изменений рабочего давления, которые могут неблагоприятно сказаться на состоянии объекта контроля. Таким образом, на примере трубопроводов горячего промперегрева показана и экспериментально подтверждена принципиальная возможность прогнозирования длительной прочности материалов, работающих в условиях высоких температур, на основе данных АЭ, получаемых в процессе мониторинга. Учитывая наличие и готовность к применению необходимых аппаратных и программных средств, можно говорить о том, что разработаны соответствующие методика и технология.

Отметим, что, зная предел длительной прочности материалов и разрушающую нагрузку в каждый момент времени эксплуатации конструкции, можно оценить остаточный ресурс материала. На рис. 4 представлена условная схема определения ресурса по изменению во времени прогнозной разрушающей нагрузки материала конструкции, получаемой с помощью системы АЭ мониторинга ЕМА 3.9. График позволяет приближенно оценить время до пересечения линии экстраполяции этих данных (синяя линия) с красной линией, представляющей рабочую нагрузку. Пересечение этих линий укажет на время разрушения материала. Назначив определенный запас по времени, можно определить допустимый остаточный ресурс материала, а, следовательно, и время вывода конструкции из эксплуатации.

#### Выводы

Разработаны методика и технология определения предела длительной прочности материалов и разрушающих материал нагрузок промышленных конструкций, работающих при высоких температурах, на основе данных АЭ. Это позволяет в реальных условиях эксплуатации в любой момент времени и независимо от объема наработки и колебаний температуры определять разрушающую нагрузку и предел длительной прочности материала конструкций.

Разработанные методика и технология определения разрушающей нагрузки и предела длительной прочности реализованы в программном обеспечении для систем АЭ мониторинга EMA3.9, что, в частности, позволяет определять координаты мест с минимальным значением предела длительной прочности и разрушающей нагрузки, указывая, тем самым, наиболее проблемные области конструкций.

С целью обеспечения запаса по времени при принятии решения о состоянии контролируемого объекта, для прогнозируемых предела длительной прочности и разрушающей нагрузки установлены коэффициенты запаса, определяемые системой мониторинга автоматически в зависимости от степени опасности развивающихся в материале деструктивных процессов.

По изменению с течением времени прогнозных значений разрушающей нагрузки либо предела длительной прочности можно оценить остаточный ресурс материала конструкции, находящейся в эксплуатации.

- 1. *Березина Т. Г.* Исследование закономерностей развития разрушения при ползучести теплоустойчивых сталей // Пробл. прочности. 1985. № 8. С. 48–52.
- Березина Т. Г., Бугай Н. В., Трунин И. И. Диагностирование и прогнозирование долговечности металла теплоэнергетических установок. – Киев: Техніка, 1991. – 120 с.
- 3. Исследование АЭ характеристик стали 12Х18Н10Т при температуре 560 °С. Сообщение 1. Методика и некоторые результаты / А. Я. Недосека, С. А. Недосека, А. А. Грузд и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. 2011. № 1. С. 13–19.
- Исследование АЭ характеристик материалов при высоких температурах. Сообщение 1. Методика / Л. Лобанов, А. Недосека, С. Недосека и др. // Там же. – 2009. – № 1. – С. 5–10.
- Исследование АЭ характеристик материалов при высоких температурах. Сообщение 2. / Л. М. Лобанов, А. Я. Недосека, С. А. Недосека и др. // Там же. – 2009. – № 4. – С. 5–13.
- Куманин В. И., Ковалева Л. А., Алексеев С. В. Долговечность металла в условиях ползучести. М.: Металлургия, 1988. 202 с.
- Минц И. И., Березина Т. Г., Ходыкина Л. Е. Исследование тонкой структуры и процесса образования пор в стали 12Х1МФ при ползучести // Физ. металлов и металловедение. – 1974. – 37, вып. 4. – С. 823–876.
- 8. Тайра С., Отани Р. Теория высокотемпературной прочности материалов. М.: Металлургия, 1986. 279 с.
- ТУ 14-3-460: 2009/ ТУ 27.2-05757883-207: 2009. Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов.
- Недосека С. А. Объектный подход к решению задач механики несплошной среды и прогнозированию состояния материалов // Техн. диагностика и неразруш. контроль. 1998. № 1. С.13–21.
- 11. *Недосека С. А.* Прогноз разрушения по данным акустической эмиссии // Там же. 2007. № 2. С. 3–9.
- 12. Недосека С. А., Недосека А. Я. Комплексная оценка поврежденности и остаточного ресурса металлов с эксплуатационной наработкой // Там же. – 2010. – № 1. – С. 9–16.
- Мортон К. Смит. Основы физики металлов. М.: Металлургиздат, 1962. 456 с.
- 14. Модель накопления повреждений в металлических материалах при статическом растяжении / А. А. Лебедев,

Н. Г. Чаусов, С. А. Недосека, И. О. Богинич // Пробл. прочности. – 1995. – № 7. – С. 31–40.

*Недосека А. Я.* Основы расчета и диагностики сварных конструкций / Под ред. Б. Е. Патона. – Киев, Индпром, 2008. – 812с. 16. Структура, повреждаемость и свойства гибов паропроводов после длительной эксплуатации / П. И. Минц, Т. Г. Березина, Л. Е. Ходыкина и др. // Теплоэнергетика. – 1981. – № 10. – С. 49–51.

Acoustic emission (AE) based prediction of breaking load in piping of thermal power stations operating at high temperature is considered. It is shown that the breaking load predicted by the system of continuous AE monitoring with accuracy sufficient for practical purposes, also determines material long-term strength, irrespective of operating time and working temperature. Safety factors by predicted breaking load were established to increase the reliability when taking a decision on the need for shutting down and taking a structure out of operation, based on AE monitoring data. Considering the availability and readiness for application of the required hardware and software, we can say that the respective procedure and technology have been developed. 16 References, 4 Figures, 1 Table.

Keywords: acoustic emission, long-term strength, breaking load, prediction, residual life, safety factor

Поступила в редакцию 26.05.2014



Российское общество по неразрушающему контролю и технической диагностике (РОНКТД) проводит Вторую ежегодную выставку средств и технологий неразрушающего контроля Территория NDT–2015, которая пройдет с 3 по 6 марта 2015 г. в Москве, в Павильоне №2 ЦВК «Экспоцентр» на Красной Пресне.

В 2014 г. форум Территория NDT проводился впервые, тем не менее, он собрал более 100 ведущих российских и зарубежных компаний. Выставку посетили более 2500 человек из России, Украины, Германии, Чехии, Италии, Болгарии, Китая, Великобритании, Франции, Сербии. В круглых столах приняли участие более 400 специалистов. Обсуждения велись по актуальным вопросам применения НК в различных отраслях.

Свое участие в выставке Территория NDT-2015 подтвердили компании Helling GmbH, НУЦ Контроль и диагностика, АКА-контроль, Olympus, Алтек, ПромГруппПрибор, STARMANS, Просек-Рус, ИНТРОН ПЛЮС, ТЕККНОУ, НИКИМТ-Атомстрой, ТКС, Энергодиагностика, НПП Монотест, Юнитест, НПП ПРОМПРИБОР, НИИИН МНПО «Спектр», АКС, КОНСТАНТА, НУЦ «Качество».

В экспозиции Территории NDT-2015 будут представлены современные приборы НК и ТД, основанные практически на всех известных физических методах, от рентгеновских и акустических до капиллярных и течеискания.

Основные разделы выставки: неразрушающий контроль и техногенная диагностика, лабораторный и измерительный контроль, промышленная автоматизация измерений и испытания материалов.

www.expo.ronktd.ru

# WCNDT 2016 – 19-я Международная выставка и конференция по неразрушающему контролю

#### 13.06.2016 - 17.06.2016

#### Германия, Мюнхен

Эта крупнейшая в отрасли НК и ТД выставка проходит 1 раз в 4 года (в 2000 году – Рим, 2008 – Шанхай, 2012 – Дурбан).

#### Отраслевая направленность конгресса WCNDT:

- Авиакосмическая, железнодорожная, автомобильная, судостроительная отрасли
- Нефтегазодобывающая, трубопроводная
- Архитектура и мостостроение
- Атомная промышленность, электроэнергетика
- Общая механика, материаловедение, производство и обработка
- Материалы (черные и цветные металлы, композиты, керамика, полимеры)
- Горное машиностроение
- Сертификация, тренинг
- Химия, нефтехимия, котлостроение
- Обработка данных, сенсоры
- Комплексные (безопасность, защита от радиации, оценка срока службы)
- Надежность систем контроля
- Стандартизация и др.

Методы тестирования: радиографическое (RT), ультразвуковое (UT), акустико-эмиссионные (AT), инфракрасное термографическое (TT), капиллярное (LT), магнитно-порошковое (MT), проникающее (PT), индукционное (ET), визуальное (VT) и др.

# ТЕОРИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ЭХО-АМПЛИТУДНОЙ ДЕФЕКТОМЕТРИИ

#### Развернутая модель ультразвукового поля эхо-канала

#### В. Ф. ДАВИДЕНКО

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

Проведено графоаналитическое исследование энергетических и геометрических свойств модели ультразвукового поля эхо-канала (УПЭК), успешное благодаря относительно простой функциональной связи между тремя безразмерными переменными. учитывающими все исходные физические величины, раздельно для сред без затухания (р. х. у) и с затуханием звука (q, u, v). Полученные математические уравнения моделей УПЭК для идеальных и реальных сред имеют параметрический характер, позволяющий решать прямую и обратную задачи дефектометрии. Впервые сделана важнейшая поправка в уравнениях УПЭК через учет диаграммы направленности поля. Введены новые единицы измерения базовых параметров амплитуды эхо-сигналов, дальности отражателей и затухания звука. Впервые применены частные производные от амплитуды эхо-сигнала по размеру эквивалентного отражателя в качестве меры чувствительности УПЭК –  $\partial q/\partial v = B$ , и по дальности отражателя в качестве меры ослабления УПЭК –  $\partial q/\partial u = G$ . Сформулировано условие точности ультразвуковой эхо-амплитудной (УЭА)-дефектометриии как максимизация чувствительностей трех родов:  $\partial B_1/\partial u$ ,  $\partial B_2/\partial v$  и  $\partial B_3/\partial q$ , обеспечивающая оптимальное выделение полезных эхо-сигналов, максимально точное измерение размеров эквивалентных отражателей и съем наиболее достоверных результатов дефектометрии при ручном сканировании объекта контроля. Впервые выявлена локальность чувствительностей трех родов, выражающаяся экстремальным характером изменения их величин. Выявлена взаимосвязь между дискретностью измерения базовой амплитуды эхо-сигналов и шириной огибающих трех родов чувствительностей, характеризующей погрешности операций УЭА-дефектометрии. Установлен главный измеряемый параметр УЭА-дефектометрии, аналогом которого можно считать современную временную регулировку чувствительности (ВРЧ) и обоснованы возможные разновидности АРД-диаграмм для практической УЭА-дефектометрии. Библиогр. 4, табл. 9, рис. 27.

Ключевые слова: ультразвуковое поле эхо-канала, ультразвуковая эхо-амплитудная дефектометрия, чувствительность трех родов, базовая амплитуда эхо-сигнала, базовая дальность отражателя, эквивалентный отражатель, комплексная базовая амплитуда, обобщенный размер эквивалентного отражателя

Более десяти лет назад появились первые публикации [1, 2] по УЭА-дефектометрии на основе новой теории, получивший название элементарная неволновая теория поля (ЭНТП). Главная особенность новой теории заключается в том, что под интеграл полного акустического давления на идеальный плоский диск («эквивалентный» отражатель звука) впервые введено вероятностное уравнение диаграммы направленности УЗ преобразователя. В результате получено решение интеграла амплитуды эхо-сигнала в виде параметрического уравнения УПЭК, связывающего три безразмерные переменные – функцию, аргумент и параметр, которые могут меняться местами и назначениями.

Разнообразие математических решений параметрического уравнения и их графических выражений для усиления логического восприятия моделей УПЭК представлено табл. 1–9, составленными однотипно по три из математической и графической модели в одной таблице.

Рассмотренная в данной статье теория УЭА-дефектометрии представлена в международных научных журналах [3, 4].

Физические переменные	Параметры, единицы измерения	Понятия, определения, обозначения
Площадь «эквивалент- ного» отражателя (ЭО)	Площадь, мм <sup>2</sup>	Условный дисковый отражатель на месте реаль- ного дефекта определяет параметры эхо-сигнала (амплитуду и задержку), эквивалентные реаль- ным условиям УЭА дефектометрии, <i>S</i> ;
Амплитуда базового опорного эхо-сигнала	Полная высота экрана на <i>М</i> пикселей	Максимальная амплитуда эхо-сигнала от дна клиновидного образца, достигаемая регулиров-кой коэффициента усиления: <i>Q</i> = 1 = 0 дБ

## Исходные физические величины и параметры УПЭК

- НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

		Продолжение
Амплитуда эхо-сигнала от реального дефекта	Отрицательные децибе- лы, –дБ	Амплитуда эхо-сигнала, измеряемая по цифровому дисплею с фиксированным шагом дискретности $-\Delta D$ (дБ) по формуле: $A = m\Delta D$ (-дБ)
Дальность реального дефекта	Расстояние до центра де- фекта по лучу УПЭК, или дальность ЭО, мм	Расстояние, определяемое произведением скорости распространения ультразвука в ОК на половину задержки эхо-сигнала от реального дефекта: $r = CT/2$ (мм)
Коэффициент затухания ультразвука в материале объекта контроля (ОК)	Обратная величина базовой дальности пробега звукового импульса $L_{6^{\prime}}$ 1/мм	В качестве базовой дальности пробега эхо-сигнала принята дальность ЭО, на которой амплитуда эхо-сигнала ослабевает на 2123 (–дБ), откуда коэффициент затухания определяется как $\delta = 1/L_6$ (1/мм)
Длина УЗ в материале ОК	Расстояние, мм	Путь пробега волны за период колебаний излучателя звука, равный $\lambda = C/f$ (мм)
Размер пьезоэлемента	Диаметр, мм	Предпочтительным при использовании по- перечных волн считаются величины $df \approx \approx 2430 \text{ мм} \cdot \text{М} \Gamma$ ц, $f = 25 \text{ M} \Gamma$ ц, откуда $d = 612 \text{ мм}$

## Безразмерные переменные для математического описания УПЭК

Формулы перехода от размерных величин	Понятия, определения			
к безразмерным				
В среде без з	затухания звука			
$p = A/Q = m/M = 1,222^{-D}$	Базовая относительная амплитуда эхо-сигнала			
$x = r\lambda/d^2 = r/n\lambda = r/L_{\rm up}$	Относительная дальность ЭО			
$y = \sqrt{S} / d$	Относительная величина ЭО			
$L_{\rm np} = n\lambda$	Предельная дальность УПЭК, мм			
В реальных средах				
$q = ngp = 1,122^{-D}$	Базовая относительная амплитуда эхо-сигнала			
$u = ngx = \delta r = r/L_{6}$	Базовая относительная дальность ЭО			
$v = ngy = \delta\sqrt{nS} = \sqrt{nS} / L_{6}$	Масштабный размер ЭО			
$z = v / u = y / x = d\sqrt{S} / \lambda r = \sqrt{nS} / r$	Обобщенный комплексный параметр ЭО			

## Новые безразмерные параметры УПЭК

Параметры УПЭК	Понятия, определения
$n = d^2/\lambda^2$	Динамический диапазон активной площади преобразователя
$g = \delta \lambda = \lambda / L_{\delta}$	Удельное затухание звука или затухание на длине одной волны
$ng = n\lambda/L_6 = L_m/L_6$	Доля ослабления УПЭК в идеальной среде от базового затухания
un u	2123 (-дБ/1) (масштаб ослабления УПЭК)
$q = 10^{-D/20} = e^{-D/8.686} = 1,122^{-D}$	Связи между относительной мерой амплитуды эхо-сигналов и деци-
	бельной мерой D (-дБ) (тождественные выражения связи);
$G = \partial q / \partial u$	Ослабление базовой амплитуды эхо-сигналов, вызванное увеличени-
	ем дальности отражателей (ослабление УПЭК)
$B = \partial q / \partial v$	Прирост базовой амплитуды эхо-сигналов, вызванный приростом раз-
	меров ЭО (чувствительность УПЭК)

*Промежуточный вывод*: пять исходных физических переменных и два параметра заменены двумя совокупностями по три безразмерных переменных для идеальной и реальной сред.

# Построение физико-математической модели УПЭК

### Вероятностная модель диаграммы направленности поля

Круглый преобразователь с площадью  $S_0 = \pi d^2/4$  разбит на элементарные излучатели площадью  $\lambda^2/4$ , количество которых равно  $\pi d^2/\lambda^2 = \pi n$ . Каждый такой излучатель имеет круговую диаграмму направленности  $\Phi(\phi) = \cos \phi$ . Поэтому излучение зондирующих импульсов и прием эхо-сигналов в УПЭК описаны как плотности вероятностей событий, состоящих в совместном излучении–приеме сигналов от  $\pi n$  независимых источников в разных направлениях. Распределение этих плотностей вероятности интерпретированы как ДН преобразователя в режиме излучения–приема:

$$\Phi^{2}(\varphi) = (\cos\varphi)^{2\pi n} = (1 + tg^{2}\varphi)^{-\pi n} = (1 + a^{2}/r^{2})^{-\pi n} =$$
  
=  $(1 + nS/\pi nr)^{-\pi n} \approx \exp(-nS/r^{2}) =$  (1)  
=  $\exp(-v^{2}/x^{2}) = \exp(-v^{2}/u^{2}).$ 

При условии, что  $\pi n \ge 10^2$ , ошибка замены функций не более 0,1 %.



=[ $2J_1(X)/X$ ]<sup>2</sup>, 3 –  $\Phi^2(\varphi) = \exp(-nS / r^2) = \exp(-y^2/x^2)$  при  $X = (kd)\sin\varphi = (\pi d/\lambda)\sin\varphi$ , где  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число.

## Амплитудно-размерная модель УПЭК в идеальной среде

Таблица 1



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ



# Модель чувствительности УПЭК в идеальной среде

## Особенности распределения чувствительностей УПЭК по трем независимым переменным



Математические модели	Графические модели
Чувствительность УПЭК к размерам ЭО (основное понятие): $\partial p/\partial y = B =$ =2(y/x)exp (-y <sup>2</sup> /x <sup>2</sup> ). (7) Изменение чувствительности УПЭК 1-го рода от дальности: $\partial B_1/\partial x = -2(z/x)(1-2z^2)\exp(-z^2).$ Максимум $\partial B_1/\partial x$ соответствует оптимальному значению: $z_{opt} = y / x = \sqrt{nS} / r = \sqrt{0,5}$ . (8)	Рис. 5. Распределение чувствительности УПЭК 1-го рода по дальности отражателей
Изменение чувствительности УПЭК 2-го рода от размеров ЭО для их разных дальностей: $\partial B_2/\partial y = 2(y/x)\exp(-y^2/x^2)$ . (9) Условие максимума чувствительно- сти УПЭК 2-го рода к размерам ЭО: $\partial B_2/\partial y = (2/x)(1-2z^2)\exp(-z^2) = 0$ соответствует оптимальному значе- нию: $z_{opt} = y / x = \sqrt{nS} / r = \sqrt{0,5}$ .	Puc. 6. Распределение чувствительности УПЭК 2-го рода по размерам ЭО
Чувствительность УПЭК 3-го рода к размерам ЭО для базовых амплитуд эхо-сигналов: $\partial B_3 / \partial p =$ (10) $= (1 - p / x) \sqrt{-\ln(1 - p / x)}$ . Условие максимума чувствите- льности УПЭК 3-го рода к базовым амплитудам эхо-сигналов: $\partial B_3 / \partial p = -2\ln(1 - p/x) - 1 = 0$ , что соответствует оптимальному значению: $p_{opt} = P/Qx = 0,394$ . (11)	В <sub>1</sub> 0.8 0.6 0.4 0.2 0.2 0.2 0.4 0.6 0.6 0.6 0.6 0.8 1.0 Рис. 7. Распределение чувствительности УПЭК 3-го рода по амплитудам базовых эхо-сигналов

< научно-технический раздел—

# Развернутая модель УПЭК в реальной среде

# Амплитудная (энергетическая) модель УПЭК

#### Таблица З



# Геометрическая модель УПЭК в реальной среде

## Таблица 4



Рис. 11. Размерная физико-математическая модель УПЭК в реальной среде



Структура ближней зоны УПЭК исследуется через производную  $\partial q/\partial u = 0$  с помощью уравнения (14), рассмотренного далее.

Пределы по дальности для каждой равносигнальной линии УПЭК для заданного уровня *q* определяются из условия:

$$qe^{2u-1} = 2u.$$
 (19)

Это уравнение решается наложением прямой  $y_1 = 2u$  и кривых:

 $y_2 = 1 - \ln(q/2u),$  (20) представленных на рис. 13, где сверху вниз:

q = 0, 1; 0, 5; 1, 0.

С помощью рис. 11 и 13 строится геометрическая граница УПЭК откладыванием на равносигнальных линиях рис. 11 их пределов по дальности, взятых из рис. 13.







*Рис.* 13. Пределы по дальности равносигнальных силовых линий УПЭК

# Графоаналитические решения уравнений (14) и (16)

Таблица 5	
Математические модели	Графические модели
Уравнение (14) решается графоаналитическим разбиени- ем на два уравнения:	
ем на два уравнения. $y_1 = 0, 5 - u,$ (21, <i>a</i> ) $y_2 = z/(e^z - 1),$ (21, <i>б</i> ) где уравнение (21, <i>б</i> ) заменяется семейством простых линейных уравнений при $v = \text{const}$ (рис. 14): $y_3 = 1, 15u/v0, 5,$ исходящих из точки (0; -0, 5). Сравнение уравнений (21, <i>a</i> ) и (21, <i>б</i> ) дает решение в виде 1, 15 $u/v = 1 - u.$ (22) Отсюда безразмерная длина ближней зоны u = v/(1.15 + v): (23)	
размерная длина ближней зоны $r_c = (1,15 / \sqrt{nS} + \delta)^{-1}$ . (24)	<ul> <li><sup>0.5</sup> Балавая относительная дильность ЭО и</li> <li>Рис. 14. Графическая схема решения уравнения (14)</li> </ul>
Условие максимума чувствительности УПЭК (16) преобразуется в уравнение: $\sqrt{nS} = r_{opt} \sqrt{\delta r_{opt}} + 0.5$ , (25) связывающее между собой обобщенный размер ЭО с оптимальной дальностью при известных начальных условиях: параметре преобразователя $n = d^2/\lambda^2$ и коэффициенте затухания звука $\delta$ в материале ОК. Непрямое уравнение (25) графически строится в виде номограммы (рис. 15), которая, при экспериментальном выделении максимальной амплитуды эхо-сигнала от ЭО используется для определения коэффициентов затухания звука в точке пересечения координат обобщенного размера ЭО и оптимальной дальности.	кори з ММ         кори з ММ           80         5         0

# НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ-

# Модели локальной чувствительности УПЭК

#### Таблица б



# Модели ослабления локальных максимумов чувствительности УПЭК 3-х родов







 $B_{2\text{max}} = 4,67e^{-2,83\nu}$ . (37) Ослабление максимумов чувствительности УПЭК 2-го рода:

$$\partial (\ln B_{2\max}) / \partial v = G_2 = 24,58 - \text{д}\text{Б}/1.$$
 (38)

Градиент ослабления (затухания) чувствительности УПЭК 2-го рода  $G_2$  – постоянная величина (линия *A* на рис. 20).

Локальные максимумы чувствительности УПЭК 3-го рода для комплексных базовых амплитуд на разных дальностях при  $q_{kmax} = 0,394$ :

$$B_{3\max} = 4e^{1-2u}(1-q_k) \times \sqrt{-ln(1-q_k)} = 4,66e^{-2u}.$$

Ослабление максимумов чувствительности УПЭК 3-го рода:

$$\partial(B_{3\max})/\partial u = G_3 = 17,38, -дБ/1.$$



*Рис. 20.* Ослабление локальных максимумов чувствительности УПЭК 2-го рода



#### сти УПЭК 3-го рода

# Комплексные чувствительности УПЭК 3-х родов для решения трех основных задач дефектометрии

(39)

### Таблица 8



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ-

Таблица 9.

# Развитие видов АРД-диаграмм

#### Математические молели Графические модели D Теоретическая АРД-диаграмма (номограмма): $D = 17,37 \{1 + \ln u - 2u +$ 8 $+ \ln[1 - \exp(-v^2/u^2)]$ (- $\pi E$ ). (40)-12Равноразмерные линии диаграммы в диапазонах: -18 $0.6 \le v \le 1.2$ и $1 \le u \le 2.5$ в логарифмическом -24масштабе имеют незначительную кривизну, что -30 позволяет аппроксимировать их наклонными -36 прямыми: -42 $D = 12 - \gamma T (-дБ),$ 48 0.5 1.0 1.5 2.0 Базовая относительная дальность ЭО и где $\gamma$ – коэффициент затухания, дБ/мкс. Рис. 25. Теоретическая АРД-диаграмма (номограмма) $D_{\kappa}$ Экспериментально-теоретическая АРД-диаграмма по уравнению: $1 - \exp(-v^2/u^2) = q e^{2u-1}/2u = q_{\mu}$ (41)Левая сторона уравнения – теоретическая (-дБ). Правая сторона рассчитывается как комплексная -16 базовая амплитуда $D_{\iota}$ (-дБ) с дальностью и в -24 заштрихованной области АРД-диаграммы при условиях: -32 $q_{_{\rm B}} = 1,1ue^{-2u}$ и $q_{_{\rm H}} = 3,3ue^{-2u}$ для чувствительности УПЭК 3-го рода на уровне 0,9. 0.4 0.8 1.2 1.6 Базовая относительная дальность ЭО и Рис. 26. Экспериментально-теоретическая АРД-диаграмма Универсальная АРД-диаграмма в виде прямо-угольной сетки, в пределах которой решается обратная 0.3max залача УЗК: 0.8 $v = u \sqrt{-\ln(1-q_k)} ,$ (42)0.6где $q_{\nu} = 1,122^{-D}e^{2u-1}/2u$ с линейно-графическим преобразованием в семейство наклонных прямых 0.4в границах УПЭК. Между прямыми $q_{\mu} = 0,2$ и $q_{\mu} = 0,6$ – область чув-0.2ствительности УПЭК 3-го рода на уровне 0,9 (заmin штрихована на рис. 27). Уравнение границы УПЭК с приведенной чув-0 1.0 Базовая относительная дальность ЭО и

ствительностью C = 0.5Рис. 27. Универсальная АРД-диаграмма в виде прямоуголь-

 $v = u \sqrt{-\ln(Cu)}$ . (43) ной сетки v – u

#### Выводы

Математическая модель УПЭК построена на основе законов лучевой акустики тракта, вероятностной обратимой модели диаграммы направленности преобразователя и идеальной модели «эквивалентного» отражателя (ЭО).

Шесть безразмерных переменных, адекватно описывающих модель УПЭК, разделены для сред без затухания и для сред с затуханием звука, между которыми установлена связь через коэффициент ng, выражающий масштаб ослабления УПЭК в реальной среде по сравнению с идеальной средой.

Установлено, что ослабление УПЭК от дальности отражателей в идеальной среде составляет 1,5...2,0 –дБ/1, а в реальной среде ослабление звука на базовой единице дальности составляет 21...23 –дБ/1, т. е. на  $\approx$  20 –дБ сильнее из-за совместного влияния расширения фронта импульса

и затухания звука. Исследована динамика чувствительности УПЭК, которая зависит не только от величины переменных, но и от характера взаимосвязи между ними, которая формирует локальные колоколообразные формы огибающих чувствительностей УПЭК 3-х родов с постоянными максимумами в идеальной среде и с ослабевающими максимумами в реальной среде.

- НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Ширины локальных колоколообразных форм огибающих чувствительностей УПЭК 3-х родов на фиксированных уровнях от их максимумов при данной дискретности измерения амплитуды эхо-сигналов используются для оценки погрешностей выделения, измерения и снятия размеров эквивалентных отражателей.

Установлен основной измеряемый параметр УЭА-дефектометрии в виде комплексной базовой амплитуды эхо-сигналов (аналог современной временной регулировки чувствительности), имеющей оптимальное значение  $q_{kopt} \approx 0,4$  для максимальной чувствительности УПЭК 3-го рода.

В целом предложенная теория УПЭК себя не исчерпала и может быть продолжена в других

практических направлениях УЭА-дефектометрии на основе дальнейшего физико-математического анализа исходных моделей.

- 1. Давиденко В. Ф. Об элементарной неволновой теории поля ультразвуковых преобразователей для ипульсно-амплитудной дефектометрии // Техн. диагностика и неразруш. контроль. -2010. № 3. С. 29-36.
- 2. Давиденко В.Ф. Новые представления о чувствительности поля – новые возможности повышения точности ультразвуковой эхо-амплитудной дефектометрии // Там же. – 2011. – № 3. – С. 28–34.
- 3. *Davidenko V. F.* The metrologic fundamentals of Ultrasonic Echo-Amplitude (UEA) defectometry // Int. J. Microstructure and Properties. 2013. **8**, № 3. P. 207–224.
- Davidenko V. F. Principles of elenentary non-wave theory of field of ultrasonic transducers used for pulse-amplitude defectometry // Int. J. Materials and Product Technology. – 2006. – 27, № 3/4. – P. 173–187.

Graphic-analytical study of energy and geometrical properties of the model of ultrasonic field of echo-channel (UFEC) has been performed, which was successful owing to a relatively simple functional link between three dimensionless variables, allowing for all the initial physical quantities (p, x, y), separately for media with and without sound attenuation (q, u, y). Derived mathematical equations of UFEC models for ideal and real media are of parametric nature, allowing solution of the direct and inverse problems of defectometry. A most important correction in UFEC equations, allowing for field directional pattern was made for the first time. New units for measurement of base parameters of echo-signal amplitude, reflector distance and sound attenuation were introduced. Partial derivatives of echo-signal amplitude by the equivalent reflector size were used for the first time as the measure of UFEC sensitivity  $-\partial q/\partial v = B$ , and by the distance to reflector as a measure of UFEC attenuation - $\partial q/\partial u = G$ . Condition of accuracy of ultrasonic echo-amplitude (UEA)-defectometry was defined as maximizing the sensitivity of three kinds:  $\partial B_1/\partial u$ ,  $\partial B_2/\partial v$  and  $\partial B_2/\partial q$ , ensuring optimum separation of useful echo-signals, maximum accurate measurement of dimensions of equivalent reflectors and taking the most valid results of defectometry at manual scanning of the object of control. Local sensitivity of three kinds was detected for the first time, which is expressed in the extreme nature of change of their values. An interrelation was established between the discreteness of measurement of basic amplitude of echo-signals and width of envelopes of three kinds of sensitivities, characterizing UEA-defectometry operation errors. The main measured parameter of UEA-defectometry was established, the analog of which can be regarded to be modern time adjustment of sensitivity; and possible variants of ADD diagrams for practical UEA-defectometry were substantiated. 4 References, 9 Tables, 27 Figures.

K e y w o r d s: ultrasonic field of echo-channel, ultrasonic echo-amplitude defectometry, sensitivity of three kinds, basic amplitude of echo-signal, basic distance to reflector, equivalent reflector, complex basic amplitude, generalized size of equivalent reflector

Поступила в редакцию 03.02.2014

## НОВАЯ КНИГА

**Інститут електрозварювання імені Є. О. Патона: 80 років** / Ред. кол. Б. Є. Патон (голова) та ін. – К.: Академперіодика, 2014. – 400 с.

В сборнике представлены научно-информационные материалы, посвященные основным направлениям развития научно-технической и производственной деятельности Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины на протяжении 80 лет его существования. Освещены основные вехи создания, становления и развития института. Отображены научные достижения в области сварки и родственных технологий, сотрудничество с промышленными предприятиями, международная деятельность. Представлена современная структура института и основные направления исследований и их внедрение в производство.

Рассчитан на широкий круг ученых, преподавателей, аспирантов, студентов вузов, а также исследователей истории развития технических наук.



# КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЯЗКОГО РАЗРУШЕНИЯ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ В ОБРАЗЦЕ ШАРПИ

### И. В. МИРЗОВ

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

Предлагаемая модель учитывает изменение предела текучести поперек сварного соединения на основе распределения твердости по Виккерсу. Свойства основного металла (модуль Юнга, предел текучести, кривая деформационного упрочнения) получены в ходе эксперимента по растяжению гладких цилиндрических образцов из стали 10Г2ФБ. Разработанная модель включает критерий вязкого разрушения, связывающий критические деформации с жесткостью напряженного состояния. Корректность модели вязкого разрушения материала проверена путем сравнения диаграммы растяжения гладкого образца в реальном опыте с результатами численного расчета. Получена расчетная зависимость энерговложений в испытаниях по разрушению образца Шарпи от ширины разупрочненной зоны в диапазоне от 0,5 до 6,0 мм. Проведенные расчеты показывают, что меньшие значения ударной вязкости соответствуют сварным соединениям с меньшей шириной зоны соединения. Установлено, что вариация ширины зоны соединения влияет на величину критического прогиба: чем уже зона соединения, тем при меньшем прогибе инициируется разрушение. Модель может быть использована для изучения напряженно-деформированного состояния сварных соединений, полученных контактной сваркой оплавлением. Библиогр. 12, табл. 1, рис. 5.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, вязкое разрушение, образец Шарпи, сварное соединение, контактная сварка оплавлением, анизотропия

В соответствии с общепринятой мировой практикой к ответственным сварным соединениям независимо от способа сварки предъявляются требования по вязкости разрушения, определяемой в ходе испытаний стандартных ударных образцов.

Разрушение происходит в результате инициирования и роста дефектов в материале. При разрушении бездефектной среды тратится намного больше энергии, чем при развитии уже существующих дефектов. Тщательные исследования структуры соединений, полученных контактной сваркой оплавлением (КСО), показывают, что материал сварного соединения не содержит явных несплошностей, которые можно идентифицировать как дефекты. Этот факт дает повод ожидать высокие значения ударной вязкости и опыты по разрушению сварных образцов без надреза такие ожидания оправдывают: образец не разрушается, а лишь претерпевает сильные пластические деформации [1]. Однако сварные образцы с V-образным надрезом стабильно показывают низкие значения ударной вязкости.

Целью данной работы является разработка компьютерной модели вязкого разрушения стандартного образца Шарпи с V-образным надрезом и изучение влияния анизотропии механических свойств в сварном соединении на разрушение образца.

Методика эксперимента. Геометрия образцов Шарпи и эксперимент описаны в работе [2]. В данной работе использован тип образцов № 11 — стандартный образец Шарпи с V-образным надрезом.

Механические свойства материала. В основу компьютерной модели заложены механические свойства трубной стали  $10\Gamma 2\Phi F$ , полученные в ходе эксперимента по растяжению гладких образцов Ми12 тип 2 вдоль проката (рис. 1, таблица). Испытания проводили на машине MTS 318.25, программный модуль которой дает возможность получить диаграмму растяжения на всем диапазоне деформаций вплоть до разрушения. Все эксперименты проводили при нормальных условиях (T = 20 °C).

В таблице E – модуль упругости;  $\sigma_{_{\rm T}}$  – предел текучести;  $\varepsilon_{_{\rm T}}$  – деформации, соответствутющие  $\sigma_{_{\rm T}}$ ;  $\sigma_{_{\rm B}}$  – временное сопротивление;  $\varepsilon_{_{\rm B}}$  – деформации, соответствующие  $\sigma_{_{\rm B}}$ ;  $(\sigma_{_{\rm B}})_{_{\rm HOM}}$  – номинальное временное сопротивление;  $(\varepsilon_{_{\rm B}})_{_{\rm HOM}}$  – деформации,

Образец	Е, ГПа	σ <sub>т</sub> , МПа	ε <sub>r</sub>	$(\sigma_{_B})_{_{HOM}}, M\Pi a$	$(\varepsilon_{_{\rm B}})_{_{\rm HOM}}, \%$	σ <sub>в</sub> , МПа	E <sub>B</sub>	δ, %	Ψ	<i>F</i> , мм <sup>2</sup>
1	223	562	2,52.10-3	668	9,15	729	0,088	19,9	0,75	7,08
2	229	565	2,47.10-3	Брак	Брак	Брак	Брак	Брак	Брак	8,46
3	Брак	Брак	Брак	651	9,83	715	0,094	21,0	0,74	7,46
4	205	537	2.62.10-3	647	10,89	717	0,103	23,6	0,77	6,55
Средние значения	219	555	2,54.10-3	655	9,96	720	0,095	21,5	0,75	7,39

Механические свойства трубной стали 10Г2ФБ (образцы Ми12 тип 2, вдоль проката)

© И. В. Мирзов, 2014



Рис. 1. Диаграммы растяжения гладких образцов Ми12 тип 2 (кривые 1-3 – экспериментальные; 4 – проверочная расчетная)

соответствующие  $(\sigma_{R})_{HOM}$ ;  $\delta$  – относительное удлинение;  $\psi$  – относительное сужение; F – площадь поперечного сечения шейки после отрыва.

Для линейных участков экспериментальных кривых на рис. 1 и участков деформационного упрочнения получили такие значения механических характеристик материала:

$$\sigma(\varepsilon) = E\varepsilon, \ \sigma \le \sigma_{\rm T}: E = 219 \ \Gamma\Pi a, \ \sigma_{\rm T} = 555 \ M\Pi a, \sigma(\varepsilon) = A\varepsilon^n, \ \sigma_{\rm T} \le \sigma \le \sigma_{\rm B}: A = 853 \ M\Pi a, n = 0,072, \ \sigma_{\rm B} = 720 \ M\Pi a,$$

где A, n – параметры деформационного упрочнения.

Зависимость механических свойств материала от скорости деформаций  $d\varepsilon/dt = \dot{\varepsilon}$  в численной модели не описана, т. е.  $\frac{\partial \sigma_{\rm T}}{\partial \dot{\epsilon}} = 0, \ \frac{\partial \sigma_{\rm B}}{\partial \dot{\epsilon}} = 0.$ Модель учитывает инерционные силы.

Критерий вязкого разрушения. В работе [3] рассматривается зависимость критических деформаций от жесткости напряженного состояния (трехосности) *j*:

$$j = -\frac{p}{\sigma_i}, \ p = -\frac{1}{3} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3),$$
  
$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}.$$
(1)

Утверждается, что при  $j \ge 0,33$  разрушение носит характер нормального отрыва. В работе [4] средняя интенсивность деформаций є, в шейке гладкого образца в момент инициирования вязкой трещины выражается зависимостью

$$\varepsilon_{i} = \frac{1}{j} \left( \frac{1}{3} + \ln \left\{ 1 + 0, 46 \left[ \ln \frac{F_{0}}{F} - 0, 1 \right] \right\} \right) \ln \frac{F_{0}}{F}, \quad (2)$$

где  $F_0$  – начальная площадь сечения образца  $(F_0 = \frac{\pi D^2}{4} = 28,3 \text{ мм}^2)$ . Сложность в определении площади сечения шейки F связана с ее эллиптичностью, так как образцы изготовлены из прокатной

стали. Значения F были получены в ходе эксперимента по разрыву гладких образцов (таблица).

Таким образом, была найдена связь жесткости напряженного состояния ј с интенсивностью критических деформаций є:

$$\varepsilon_i = \frac{1,05}{j}.$$
 (3)

Зависимость (3) носит характер обратной пропорциональности и показана на рис. 2 (кривая 1). Точка Z соответствует значению критических деформаций, усредненных по образцам рис. 1. Кривая 2 – расчетная.

Кривая 2 на рис. 2 и кривая 4 на рис. 1 – это результат расчета растяжения гладкого образца в численной модели, созданной для проверки полученного критерия вязкого разрушения (3). Результат такой проверки свидетельствует о возможности применения критерия (3) для моделирования вязкого разрушения, в том числе стандартного образца Шарпи, полученного КСО.

Анизотропия механических свойств в сварном соединении. Изучение структуры сварного соединения КСО обнаружило узкий участок с низким пределом текучести в центральной области [5–10] (рис. 3). Предполагается, что низкая ударная вязкость обусловливается «запиранием» развивающейся в этой области пластической зоны между соседними зонами термомеханического упрочнения (ЗТМУ) [6].

В сварном шве КСО можно выделить несколько характерных участков, отличающихся структурой металла: это плоскость соединения, которая при рассмотрении шлифов часто видна как линия, участок крупного зерна, участок нормализации и участок отпуска [5].

Механические свойства материала при удалении от линии сплавления непрерывно меняются. Основываясь на распределении микротвердости по Виккерсу поперек сварного соединения (рис. 3) можно получить значения предела текуче-



Рис. 2. Связь интенсивности деформаций с жесткостью напряженного состояния: 1 – предельное состояние; 2 – расчетная кривая

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ—



*Рис. 3.* Распределение микротвердости по Виккерсу и предела текучести поперек сварного соединения

сти в различных сечениях моделируемого образца Шарпи. Согласно данным работы [11] предел текучести связан с микротвердостью по Виккерсу линейно. Для стали 10Г2ΦБ σ<sub>2</sub> ≈ 2,45 HV.

В плоскости соединения обнаруживается значительное падение предела текучести (рис. 3), участок которого можно назвать зоной соединения (3С). При разрушении образца Шарпи пластическая область локализуется в 3С, чем и обусловлено снижение значений ударной вязкости у сварных образцов, полученных КСО.

**Результаты**. Были проведены расчеты вязкого разрушения стандартного образца Шарпи для нескольких значений ширины 3С. Величина энергии разрушения и критические прогибы образца приведены на рис. 4, 5.

Связь полной энергии разрушения сварного образца Шарпи с шириной 3С нелинейна и тем меньше, чем меньше ширина 3С (рис. 4).

В работе [12] прогиб образца Шарпи в момент инициирования трещины – критический прогиб – используют как характеристическую величину для сравнения напряженно-деформированного состояния (НДС) образцов. Расчеты показали, что чем уже 3С, тем при меньшем прогибе инициируется разрушение (рис. 5).

Корректность разработанной модели вязкого разрушения образца Шарпи была проверена



*Рис. 4.* Расчетная зависимость энергии разрушения сварного образца Шарпи от ширины зоны соединения



*Рис. 5.* Результаты расчетов критического прогиба сварного образца Шарпи при вариации ширины 3С

на образцах, изготовленных из основного металла: и эксперимент, и расчетная модель показывают значения энергии разрушения на уровне 294...300 Дж.

#### Выводы

На основании полученных экспериментальных данных определены механические свойства основного металла стали 10Г2ФБ и коэффициент в выражении (3), описывающий связь критических деформаций с жесткостью напряженного состояния.

Предлагаемая модель вязкого разрушения образца Шарпи учитывает изменение предела текучести материала вдоль образца, основанное на распределении твердости в сварном соединении КСО. Модель включает критерий вязкого разрушения и позволяет отследить инициирование и рост трещины во времени, т. е. получить динамическую картину НДС при вязком разрушении образца. Численная модель экспериментально верифицирована на гладких образцах и образцах Шарпи, изготовленных из основного металла стали 10Г2ФБ.

Получена расчетная зависимость энерговложений в ударных испытаниях от ширины разупрочненной ЗС в диапазоне от 0,5 до 6,0 мм. Проведенные расчеты показывают, что меньшие значения ударной вязкости соответствуют сварным соединениям с меньшей шириной ЗС (рис. 4).

Установлено, что вариация ширины 3С влияет на величину критического прогиба: чем уже 3С, тем при меньшем прогибе инициируется разрушение (рис. 5).

Разработанная модель может быть использована для изучения НДС образцов Шарпи, изготовленных из сварных соединений КСО.

 К методологии контроля соответствия назначению сварных соединений трубопроводов, полученных контактной сваркой оплавлением / С. И. Кучук-Яценко, В. И. Кирьян,

- НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Б. И. Казымов, В. И. Хоменко // Автомат. сварка. – 2006. – № 10. – С. 3–9.

- ГОСТ 9454–78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах. – Введ. 01.01.1979
- 3. *Teng X.*, Wierzbicki T. Numerical simulation of the Taylor test with fracture // Impact & Crashworthiness Lab, Massachusetts Institute of Technology, 2008.
- 4. Копельман Л. А. Сопротивляемость сварных узлов хрупкому разрушению. Л.: Машиностроение, 1978 232 с.
- Кучук-Яценко С. И. Контактная стыковая сварка оплавлением / Отв. ред. В. К. Лебедев. – Киев: Наук. думка, 1992. – 236 с.
- Особенности испытаний на ударную вязкость сварных соединений труб, выполненных автоматической контактной стыковой сваркой оплавлением / С. И. Кучук-Яценко, В. И. Кирьян, Б. И. Казымов и др. // Автомат. сварка. – 2008. – № 10. – С. 5–11.

- Lobanov L. Welded Structures. Taylor & Francis, 1997. 300 p.
- 8. *INNOTRACK* Integrated Project no. TIP5-CT-2006-031415. D4.6.1 The influence of the working procedures on the formation and shape of the HAZ of flash butt and aluminothermic welds in rails. 2008/11/07.
- 9. *Tatsumi K., Mineyasu T., Minoru H.* Development of SP3 Rail with High Wear Resistance and Rolling Contact Fatigue Resistance for Heavy Haul Railways. JFE TECHNICAL REPORT No. 16 (Mar. 2011).
- Trends in Rail Welding Technologies and Our Future Approach / K. Saita, K. Karimine, M. Ueda et al. // Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report. – 2013. – № 12. P. 84–92.
- Марковец М. П. Определение механических свойств металлов по твердости. – М.: Машиностроение, 1979. – 191 с.
- Siewert T. A. Pendulum impact machines: procedures and specimens for verification // ASTM International. – 1995. – 298 p.

Proposed model allows for the change of yield point across the welded joint based on Vickers hardness distribution. Base metal properties (Young's modulus, yield point, deformation strengthening curve) were determined during the experiment on stretching smooth cylindrical samples from 10G2FB steel. Developed model includes tough fracture criterion, correlating critical deformations with stressed state stiffness. Correctness of the model of tough fracture of material was verified by comparison of the diagram of smooth sample stretching in a real experiment with the results of numerical computation. Calculated dependence of energy input in rupture testing of Charpy sample on softened zone width in the range from 0.5 up to 6.0 mm was derived. Presented calculations show that impact toughness values correspond to welded joints with narrower joint zone. It is established that variation of joint zone width affects the extent of critical sagging: the narrower the joint zone the smaller the sagging at which fracture is initiated. The model can used to study the stress-strain state of welded joints produced by resistance welding. 12 References, 1 Table, 5 Figures.

K e y w o r d s : computer modeling, tough fracture, Charpy sample, welded joints, flash-butt welding, anisotropy

Поступила в редакцию 31.01.2014



7.04 – 10.04 2015 г. Место проведения: Беларусь, Минск, проспект Победителей, 20/2 Организатор: ЗАО «МинскЭкспо»

## Направления экспозиций

- Материалы для сварки, наплавки и пайки
- Оборудование и технологии сварки, резки, наплавки, пайки и термообработки
- Источники питания и системы управления сварочным оборудованием
- Оборудование для орбитальной сварки и обработки труб
- Электронно-лучевая, лазерная, плазменная сварка и резка
- Автоматизированные комплексные системы и агрегаты для сварки и резки
- Автоматизация сварочных производственных и технологических процессов, программное обеспечение
- Приборы для неразрушающего контроля сварных соединений
- Научное и информационное обеспечение сварки
- Система подготовки, переподготовки и аттестации сварщиков
- Охрана труда и экологическая безопасность в сварочном производстве
- Сертификация сварочного оборудования.

#### Выставка проводится одновременно

с международными специализированными выставками «Металлообработка», «Порошковая металлургия» и международным специлизированным салоном «Защита от коррозин. Покрытия».

Руководитель проекта: Федорова Елена Владимировна тел.: +375 17 226 98 58, 226 90 83 факс: +375 17 226 98 58, 226 99 36; e-mail: e\_fedorova@solo.by

# РАЗРАБОТКА МЕТОДИК УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ УЗЛА ПРИВАРКИ КОЛЛЕКТОРА К ПАРОГЕНЕРАТОРУ ПГВ-1000М

#### А. В. ДУБ, В. А. ДУРЫНИН, А. Н. РАЗЫГРАЕВ, Н. П. РАЗЫГРАЕВ, И. Л. ХАРИНА НПО ЦНИИТМАШ. 115088, г. Москва, ул. Шарикоподшипниковская, 4. E-mail: eniitmash@cnitmash.ru Л. М. ЛОБАНОВ, В. И. МАХНЕНКО, О. В. МАХНЕНКО, Г. Ю. САПРЫКИНА ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Одна из основных проблем безопасной эксплуатации парогенераторов ПГВ-1000М – коррозионное повреждение узла приварки коллектора к патрубку Ду 1200. В статье рассмотрены методики ультразвукового контроля этого узла и оценки допустимости выявленных дефектов несплошности. Разработанные методики прошли апробации на ряде АЭС России и Украины. Применение методик позволит оперативно оценить степень опасности обнаруженных дефектов и снизить объемы работ по ремонту и замене дефектных парогенераторов. Библиогр. 22, табл. 3, рис. 21.

Ключевые слова: ультразвуковой контроль, ПГВ-1000М, узел соединения коллектора с патрубком, коррозионное растрескивание под напряжением, ультразвуковой контроль, прогнозирование, напряженно-деформированное состояние, полуэллиптическая трещина, схематизация несплошностей, диаграмма статической коррозионной трещиностойкости материала

В настоящее время одной из основных проблем безопасной эксплуатации парогенераторов ПГВ-1000М реакторных установок ВВЭР-1000 является повреждение (коррозионное разрушение) в узле сварного соединения №111 коллектора к патрубку Ду 1200. Начиная с 1998 г. на различных АЭС России и Украины были выявлены дефекты несплошности в зоне сварного соединения № 111.

Учитывая актуальность проблемы повреждаемости узла сварного соединения № 111 коллектора к патрубку Ду 1200 парогенераторов ПГВ-1000М для АЭС Украины, регулярная диагностика этого узла современными методами ульразвукового контроля (УЗК) и оперативная оценка степени опасности обнаруженных дефектов на текущий момент и на момент следующего планового контроля, несомненно, позволит существенно снизить объемы работ по ремонту и замене дефектных парогенераторов при обеспечении необходимой безопасности эксплуатации.

В статье представлены результаты работ по разработке эффективных методов УЗК узла приварки коллектора к патрубку Ду 1200 парогенератора ПГВ-1000М и соответствующих подходов оценки допустимости выявленных несплошностей.

Методика УЗК узла приварки коллектора к патрубку Ду 1200 парогенераторов ПГВ-1000М. В 1998 г. на 5-м блоке Нововоронежской АЭС во время осмотра парогенератора ПГВ-1000М (рис. 1) при подготовке блока к пуску была обнаружена утечка пара. Было установлено, что © А В Луб В А Лурынин А Н Разыграев Н П Разыграе узел соединения горячего коллектора с парогенератором содержит трещину, распространяющуюся вдоль сварного соединения. Трещина длиной ~ 310 мм начиналась на поверхности галтельного перехода радиусом 20 мм кармана, т. е. в основном металле на внутренней поверхности парогенератора (2-й контур) и росла в сторону наружной поверхности сначала по основному металлу, а затем по сварному шву № 111/1, и выходила на наружную поверхность в трех точках в виде несплошностей длиной 3...7 мм.

В связи с обнаружением трещины потребовалось разработать методику УЗК узла соединения коллектора с патрубком (УСКП) (рис. 1, *б*).

Патрубок Ду 1200 парогенератора и коллектор изготавливают из стали 10ГН2МФА (перлитного класса). Сварное соединение № 111 может быть симметричным и несимметричным. Сварной шов выполняют ручной или автоматической сваркой. Перед сваркой узла на кромки сварного соединения наносят низкоуглеродистую наплавку. Имеются парогенераторы, в которых сварное соединение № 111 низкоуглеродистых наплавок не имеет. Корень сварного шва выполняют вручную аргонодуговой сваркой с присадочной проволокой 08Г2С. Высота корневого слоя 6...8 мм. Заполнение основной части шва выполняют при ручной сварке электродами ЦУ-7 или УОНИ-13/55 диаметром 4 или 5 мм, а при автоматической сварке используют проволоку Св-08ГСМТ и Св-10ГН1МА диаметром 2 мм и флюс ФЦ-16 или АН-17.

© А. В. Дуб, В. А. Дурынин, А. Н. Разыграев, Н. П. Разыграев, И. Л. Харина, Л. М. Лобанов, В. И. Махненко, О. В. Махненко, Г. Ю. Сапрыкина, 2014

# ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ



Рис. 1. Конструкция парогенератора и узла соединения коллектора с парогенератором: *а* – фрагмент чертежа ПГВ-1000М; *б* – схема расположения сварного соединения № 111: *1* – корпус ПГ; *2* – коллектор; *3* – патрубок диаметром 1200; *4* – трубопровод Ду 850; *5* – карман; 6 – сварной шов № 111

Изготовление парогенераторов и сварных соединений выполняли в соответствии с требованиями и правилами [1 – 4].

Пространство между патрубком Ду 1200 (со стороны корня сварного шва) и корпусом коллектора носит название «карман». Карман расположен во втором контуре реакторной установки ВВЭР-1000. С другой стороны от патрубка по отношению к сварному шву узел включает коллектор со скосом 25 или 30°. На скос выходят два патрубка продувки Ду 20, расположенные через 180°. Скос выходит на патрубок коллектора Ду 850 (с антикоррозионной наплавкой), к которому приваривается трубопровод главного циркуляционного контура (ГЦК) Ду 850 (первый контур).

Для обеспечения контроля металла УСКП Ду 1200 парогенератора специалистами ЦНИИТМАШ разработана специальная «Методика ультразвукового контроля узла приварки коллектора к парогенератору ВВЭР-1000» МЦУ-11-98п. Методика использует следующие операции УЗК, установленные [5]: прозвучивание прямым преобразователем продольными волнами, прозвучивание наклонными преобразователями поперечными волнами с углами ввода 45° (-5°) и 60° (+5°) на продольные и поперечные несплошности и дополнительные операции для обеспечения прозвучивания корня сварного соединения, металла у наружной и донной поверхностей и выявления трещиноподобных дефектов по всему контролируемому объему (прозвучивание головными волнами, распространяющимися вдоль поверхности и под углом (1...15°) к ней, прозвучивание методом «корневой тандем», прозвучивание наклонным преобразователем продольными волнами с углом ввода 25 или 30° в зависимости от угла скоса коллектора).

При УЗК с помощью операций, установленных [5], чувствительность контроля и оценки качества выбирают в полном соответствии с требованиями и рекомендациями [2, 4].

Что касается определения чувствительности УЗК на поперечные несплошности, то Пункт 5.3 [5] устанавливает, что «несплошность считают поперечным дефектом (типа «Т» по [6]), если при прозвучивании в направлении продольной оси шва ее эквивалентная площадь  $S_{non}$ , независимо от условной протяженности, равна 50 % или более величины наименьшей фиксируемой эквивалентной площади, а при расположении преобразователя под углом  $90 \pm 15^{\circ}$  к продольной оси шва, его эквивалентная площадь менее  $50 \% S_{non}$ », т.е. для УСКП (и сварного соединения № 111)  $S_{non} = = 1,75 \text{ мм}^2$ .

При определении уровней чувствительности УЗК с помощью дополнительных операций руководствовались следующими соображениями. При контроле головными волнами чувствительность контроля установлена в соответствии с требованиями [7] Приложение 5 «Методика контроля подповерхностной части сварных соединений головными волнами». Браковочный уровень чувствительности устанавливается по амплитуде эхо-сигнала от плоскодонного отверстия диаметром 4 мм, расположенного в подповерхностном слое.

# ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

Для операции контроля методом «корневой тандем» из [8] в Приложении 14 рекомендуется устанавливать браковочный уровень чувствительности по амплитуде эхо-сигнала от плоскодонного отверстия диаметром 6 мм, что аналогично требованиям Правил контроля (ПК) в процессе эксплуатации КТА [9] (Германия) для контроля методом «корневой тандем» на вертикальные трещины.

Со времени разработки и начала периодического использования в плановые ремонты блоков АЭС методики МЦУ-11-98п в 2000 г. на Нововоронежской, Южно-Украинской, Балаковской, Калининской и Запорожской АЭС при УЗК были выявлены двадцать одна дефектная зона в пятнадцати парогенераторах (10 – горячие и 5 – холодные). На рис. 2 и 3 представлены некоторые данные по анализу повреждений и ремонтов. В настоящее время в России и Украине эксплуатируются девяносто два парогенератора ПГВ-1000М. При этом на некоторых узлах трещины были выявлены в нескольких зонах. Динамика роста общего количества ремонтов ПГ-1000М за период 1998 – 2013 гг. представлена на рис. 2. Как видим, имеет место постоянный, за исключением 2002, 2005 и 2008 годов, рост количества ремонтов. С 1998 по 2004 г. повреждения были выявлены на горячих коллекторах, затем, в 2011-2013 гг. были обнаружены несколько трещин на холодных коллекторах. В связи с этим на начальном этапе при анализе повреждаемости делался существенный акцент на температуру теплоносителя.

На рис. 3 представлено распределение количества поврежденных ПГВ-1000М по ориентации трещин относительно оси сварного шва. Направление трещин и зоны их расположения являются индикатором направления действия максимальных напряжений в узле. Продольные трещины распространяются вдоль оси сварного шва и на-



*Рис. 2.* Динамика общего количества ремонтов ПГВ-1000М за 1998–2013 гг.: *1* – горячие; *2* – холодные; *3* – суммарное количество

пряжения, способствующие их образованию и развитию, действуют в направлении, перпендикулярном оси шва. Поперечные трещины распространяются перпендикулярно оси сварного шва и напряжения, способствующие их образованию и развитию, действуют в направлении вдоль оси шва – кольцевые напряжения.

На рис. 4 представлена сводная дефектограмма расположения мест повреждений (трещин) в узлах приварки коллектора к патрубку Ду 1200 ПГВ-1000М.

Анализ расположения выявленных при УЗК и подтвержденных при вскрытии или выемке повреждений (трещин) показал, повреждения связаны с коррозионным растрескиванием под напряжением по механизму замедленного деформационного коррозионного растрескивания (ЗДКР) и что зона инициирования и развития трещин расположена:

вблизи начала галтели R20 кармана коллектора и перехода ее в цилиндр патрубка Ду 1200;

 под парогенератором на участке ближе к продольной оси парогенератора, где патрубок Ду 1200 имеет минимальную высоту;

 на участке с максимальной высотой патрубка Ду 1200 (на максимальном удалении от оси парогенератора) в зоне пересечения оси сварного шва и оси трубопровода ГЦК Ду 850.

Из представленных данных следует, что повреждения в УСКП являются системной проблемой и образуются в результате воздействия ряда факторов: проектных, конструкторских, технологических, монтажных и эксплуатационных.

Выделим особые случаи контроля и ремонта УСКП.



Рис. 3. Распределение количества поврежденных ПГВ-1000М по ориентации трещин относительно оси сварного шва за период 1998–2013 гг.: *I* – продольные, *II* – поперечные, *III* – поперечные



Рис. 4. Сводная дефектограмма УЗК узлов приварки коллектора к патрубку Ду 1200 за 1998–2011 гг.: 1ПГ1 – блок № 1, парогенератор № 1; Нв – Нововоронежская; Бал – Балаковская; Кал – Калининская; ЮУ – Южно-Украинская; Зап – Запорожская АЭС; 470 – длина зоны повреждения в мм (цифра в скобках – год обнаружения)

Нововоронежская АЭС. В 2004 г. в узле приварки горячего коллектора к патрубку Ду 1200 ПГВ-1000М была впервые выявлена дефектная зона в виде продольно-поперечной несплошности с параметрами, превышающими браковочные характеристики по [4] и МЦУ-11-98п. Дефектограмма УЗК представлена на рис. 5. В этом случае были определены необходимость увеличения объемов прозвучивания и целесообразность корректировки методики МЦУ-11-98п для обеспечения высокого качества УЗК по МЦУ-11-98п при обнаружении продольно-поперечных несплошностей.

Балаковская АЭС. В 2010 г. на 1ПГ-1 проведены сложные и объемные ремонтные работы узла приварки горячего коллектора. В 2006 г. этот узел уже подвергался ремонту на участке длиной ~ 500 мм. На первом этапе была выявлена продольно-поперечная трещина длиной ~ 100 мм и максимальной высотой 42 мм (рис. 6). После ремонта данного участка на этапе сдаточного УЗК после термической обработки, высокого отпуска, с противоположной стороны узла коллектора были выявлены поперечные несплошности на участке длиной ~ 90 мм. По результатам выемки и исследования дефектного металла было установлено наличие на галтельном переходе множества поперечных трещин высотой 1...8 мм. Две самые большие трещины имели высоту 25 и 18 мм. УЗК показал наличие аналогичных поперечных несплошностей различной высоты на участке длиной ~ 1680 мм. Выемка и исследование поврежденного металла подтвердили результаты ручного УЗК - наличие поперечных трещин ЗДКР. Участок узла почти в половину длины его окружности (~ 1050 мм) был впервые отремонтирован по специальной технологии. По техническому решению парогенератор допущен к эксплуатации. На парогенераторах ПГВ-1000М за одну ремонтную кампанию были выбраны и отремонтированы два участка на одном узле. Впервые на АЭС России в узлах приварки коллектора к патрубку Ду 1200 ПГВ-1000М были выявлены поперечные трещины. Ранее похожие трещины, но значительно большей высоты, были выявлены и отремонтированы на ПГ-1 и 2 блока 1 Южно-Украинской АЭС.

Визуальные, металлографические, фрактографические и спектральные исследования поврежденного металла из парогенераторов, выполненные в ЦНИИТМАШ, позволили определить природу повреждения: коррозионное растрескивание под напряжением по механизму ЗДКР.

Сопоставление результатов исследований характера повреждения металла узлов приварки горячих коллекторов к патрубкам Ду 1200 на АЭС Украины и России позволило выявить следующие

# ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ



Рис. 5. Дефектограмма УЗК узла приварки коллектора к парогенератору ПГВ-1000М Нововоронежской АЭС (2004 г.)





основные общие признаки разрушения и условий его возникновения:

место зарождения и развития повреждений.
 Зона радиусного перехода R20 и цилиндрической поверхности – «карман» коллектора;

 коррозионная природа разрушения. Начинается на внутренней поверхности, контактирующей со средой «кармана» коллектора;

 многоочаговый характер инициирования повреждений. Одинаковые для всех случаев коррозионные трещины, развивающиеся к наружной поверхности «кармана» и в окружном направлении;

 коррозионные трещины имеют множественные разветвления – сателлиты. При многоочаговом характере зарождения весьма хаотическое распространение, волосовидные окончания, поражающие большие объемы металла.

Во всех случаях внутренняя поверхность анклава «кармана» была покрыта плотным слоем продуктов коррозии и отложений со следами поражения язвенной коррозией и растрескивания. Практически полная идентичность результатов металлографического исследования характера трещин, инициирующихся в большинстве случаев от окисных очагов питтинговой коррозии. Устье и берега трещин окислены, просматривается периодичность подрастания трещин, бездеформационный характер разрушения, наличие инкубационного периода до инициирования трещин, что свойственно процессам коррозионного растрескивания.

Калининская АЭС. В 2006 г. на холодном коллекторе 1ПГ-3 были выявлены повреждения узла приварки коллектора к парогенератору. Они располагались также в районе галтели R20 вблизи патрубка Ду 20.

По результатам УЗК была размечена дефектная область, произведена вырезка металла и выемка темплета. Визуальный осмотр поверхностей темплета показал:

 на участке перехода от цилиндрической части кармана к R20, где имеет место технологиче-



*Рис.* 7. Характерная трещина ЗДКР (выявлена по результатам УЗК) после разрезки темплета (Балаковская АЭС)

ская риска, отчетливо прослеживается интенсивное коррозионное повреждение (рис. 7);

– на нижней поверхности (со стороны скоса 60°) в основном металле присутствуют протяженные повреждения металла (рис. 8);

– на поверхности кармана по всей длине галтели R20 присутствуют коррозионные поражения глубиной не менее 5 мм, которые распространяются в сторону наружной поверхности и выходят на нижнюю (боковую) поверхность темплета, с торцевой стороны она выглядит как коррозионная язва (рис. 9);

 на поверхности кармана в зоне галтели R20 имеют место прерывающиеся очаги коррозии, имеющие продольную ориентацию;

 на цилиндрическом участке наблюдается множество очагов язвенной коррозии округлой формы, а на галтели R20 очаг язвенной коррозии с преимущественно продольным плоскостным развитием.

Результаты визуального, макро- и микроанализов позволили констатировать:

 наблюдаемое повреждение носит характер многоочаговых коррозионных поражений, инициируемых на внутренней поверхности металла кармана поверхности и может квалифицироваться



*Рис. 8.* Поверхность фрагмента исследуемого темплета, контактирующей со средой второго контура



*Рис. 9.* Коррозионное поражение по линии перехода горизонтального и вертикального участков торцевой плоскости темплета

# ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ-

как язвенная коррозия с локализацией вглубь металла и развитием за период эксплуатации глубиной до 5 мм, глубина язв существенно больше диаметра устья (рис. 10);

 в зоне технологической риски и радиусного перехода язвенные коррозионные поражения ориентированы в продольном направлении, вне указанной зоны они имеют плоскостную, а также объемную форму;

 характер наблюдаемых язв (с перемычками) свидетельствует о периодическом росте повреждения, а интенсивность анодного растворения металла берегов язвы о длительном процессе развития;

 – очагов или следов коррозионного растрескивания металла как на поверхности, так и в глубине анклава язв не обнаружено.

В результате проведенных исследований:

– подтверждено наличие протяженных трещиноподобных (плоскостных) несплошностей в металле узла приварки холодного коллектора к парогенератору 1ПГ-3 Калининской АЭС, выявленных в результате УЗК по методике МЦУ-11-98п с Изменением № 1;

 установлено, что повреждение узла соединения коллектора с парогенератором 1ПГ-3 Калининской АЭС имеет коррозионный характер и произошло по механизму язвенной коррозии.

Результаты исследований поврежденного металла холодного коллектора Калининской АЭС показали, что механизм разрушения металла кармана холодного коллектора принципиально отличается от механизма ЗДКР, наблюдаемого на горячих коллекторах.

В процессе выполнения ремонта был выполнен визуальный контроль поверхности кармана эндоскопом «Olympus». Установлено, что коррозионное повреждение металла имеется по всей окружности кармана коллектора. С учетом результатов УЗК можно констатировать и предположить, что:

 на участке, зафиксированном при первичном УЗК, высота плоскостной несплошности,



*Рис. 10.* Протяженные язвенные несплошности на галтели узла (×10)

образованной при язвенном поражении металла, максимальна;

– на других участках УЗ эхо-сигналов, превышающих поисковый уровень (в данной методике это уровень регистрации отражателей), не зарегистрировано. Это позволяет сделать вывод о том, что на этих участках нет плоскостных несплошностей, или они имеют высоту не более 1,0...1,5 мм.

С учетом полученных результатов можно предположить, что на участке узла приварки холодного коллектора к патрубку Ду 1200 парогенератора ПГВ-1000М, расположенном со стороны днища парогенератора вблизи патрубка Ду 20, имеют место специфические условия для ускоренного в сравнении с другими участками язвенного поражения металла. Эти условия могут быть связаны со многими факторами: напряжениями, действующими на этом узле в данном месте, температурой металла и теплоносителя, химическим составом среды, эффективностью (или неэффективностью) технологических операций по очистке и (или) продувке кармана и др.

Следует отметить, что исследованные очаги коррозионного поражения металла выявлены после 22 лет эксплуатации парогенератора.

Таким образом, исследования и анализ повреждений и результатов неразрушающего контроля узлов приварки холодных коллекторов ПГВ-1000М показал, что:

 существуют два механизма повреждения металла узлов приварки коллекторов к парогенераторам;

 на горячих коллекторах повреждение происходит по механизму ЗДКР;

 на холодных коллекторах повреждение имеет коррозионный характер и происходит по механизму язвенной (электрохимической) коррозии;

 – детальное рассмотрение и анализ результатов УЗК позволяет в большей мере оценить картину повреждения металла узла.

Исследования и анализ параметров УЗК узлов на горячих и холодных коллекторах, сопоставление их с результатами визуальных, фрактографических, металловедческих и других исследований показали высокую эффективность ручного УЗК по методике МЦУ-11-98п при выявлении трещиноподобных дефектов в узлах приварки коллектора к парогенератору. Все выявленные несплошности были подтверждены в процессе выемки и исследовании поврежденного металла. Дополнительные детальные исследования и анализ параметров УЗК позволили разработать многофакторную картину повреждения узлов, возможности которой описаны выше.

Отметим, что при выбранном уровне чувствительности УЗК на многих парогенераторах также

## -ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

выявляются и регистрируются одиночные (точечные) отражатели в сварных соединениях № 111. В некоторых случаях они имеют эквивалентную площадь более 7 мм<sup>2</sup> при контроле преобразователем ПЦ-25-1,8П, а менее 7 мм<sup>2</sup> при УЗК прямым и наклонными преобразователями по [5].

Все выявленные на горячих коллекторах продольные несплошности – трещины при контроле преобразователем ПЦ-25-1,8П или ПЦ-30-1,8П имели:

 на отдельных участках амплитуду эхо-сигнала более браковочного уровня;

- значительную протяженность (до ~1300 мм);

 – развитие по толщине (высоте) узла от цилиндрической поверхности кармана в сторону наружной поверхности (до 70 мм).

Эти несплошности (в соответствии с пунктами 6.6 и 6.7 МЦУ-11-98п с Изменением № 1) имели признаки трещинообразного дефекта. В связи с этим узел браковался и подвергался ремонту. Случаев ложного бракования не было.

На холодных коллекторах был отмечен только один случай обнаружения и исследования поврежденного металла с выемкой темплета. Он рассмотрен нами выше с точки зрения механизма повреждения металла узла и размеров несплошностей.

На некоторых парогенераторах ПГ-1000 при УЗК по МЦУ-11-98п фиксируют отражатели в районе галтели R20 мм и сварного соединения № 111 с амплитудой соизмеримой с уровнем фиксации. Эти отражатели не имеют признаков трещиноподобного дефекта по амплитуде и по протяженности. Визуальные исследования указывают на их коррозионно-язвенный характер. Целесообразность выполнения ремонта на таких узлах многими специалистами подвергается сомнению.

Методика оценки допустимости несплошностей, выявленных в узле приварки коллектора к патрубку Ду 1200 парогенераторов ПГВ-1000М. Для обоснования работоспособности УСКП с повреждениями (несплошностями), описанными в предыдущей методике, с участием специалистов ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины была разработана «Методика оценки допустимости несплошностей, выявленных в узле приварки коллектора к патрубку Ду 1200 парогенераторов ПГВ-1000М» (МТ-Т.0.03.308-14).

В первую очередь, с целью анализа причин возникновения и развития повреждений были выполнены расчетные оценки напряженно-деформированного состояния узла сварного соединения № 111. Нагруженность рассматриваемого узла определялась с учетом рабочих напряжений от давления рабочей среды 1-го и 2-го контура, а также остаточных напряжений, связанных с технологией изготовления или последующего ремонта. Расчеты напряжений от рабочего давления на стационарном температурном режиме при нормальных условиях эксплуатации (НУЭ) в стенках кармана проводились в общей трехмерной постановке МКЭ с учетом отсутствия осевой симметрии узла соединения патрубка с корпусом парогенератора. Как показали результаты расчета [10, 11] распределение осевых напряжений о (P) от рабочего давления на внутренней поверхности в зоне сварного соединения № 111 имеет переменный характер по величине в зависимости от окружной координаты. При этом в области самой низкой и высокой длины патрубка расположены зоны низких растягивающих напряжений σ\_, а между ними - зоны высоких растягивающих напряжений о ... (рис. 11). При этом имеет место резкое снижение растягивающих напряжений по толщине стенки.

Для определения распределения остаточных напряжений использовались численные методы МКЭ и компьютерная программа, входящая в систему «Weldpredictions» [12–14].

Остаточные напряжения определялись по всему объему узла сварного соединения № 111. В зоне соединения остаточные напряжения связаны в основном с технологией выполнения в заводских условиях сварного шва № 111. Штатная технология предусматривает после сварки локальный отпуск зоны соединения с достаточно длительной выдержкой (~ 8 ч) при температуре 650 °C. Расчет показал, что при таком отпуске почти полностью снижаются остаточные сварочные напряжения, но из-за локальности нагрева возникают новые остаточные напряжения. Такое остаточное напряженное состояние характеризуется довольно высокими окружными напряжениями  $\sigma_{_{BB}}$  и относительно невысокими поперечными о " напряжениями, роль которых, тем не менее, в поведении



*Рис. 11.* Расчетные данные (решение в общей трехмерной постановке) по распределению вдоль полуокружности патрубка ПГ напряжений  $\sigma_{zz}$  на внутренней поверхности стенки кармана на высоте z = 30 (1), 50 (2), 70 мм (3) от его дна, вызванное действием рабочего давления при НУЭ ( $\varphi = 0$  соответствует самой малой длине патрубка,  $\varphi = 3,14$  – самой большой)

# ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ-

наиболее часто обнаруживаемых продольных дефектов значительная.

Распределение суммарных напряжений  $\sigma_{zz}$  по толщине стенки патрубка ПГ на высоте стенки кармана z = 50 мм от его дна, вызванное действием рабочего давления при НУЭ и остаточных напряжений представлено на рис. 12.

Расчетные результаты показали высокий уровень (150...300 МПа) растягивающих напряжений, действующих в зоне сварного соединения № 111, что способствует развитию несплошностей по механизму «коррозия под напряжением». Проведенные в ИПП им. Г. С. Писаренко НАН Украины оценки развития коррозионных трещин по механизму циклического нагружения [15], связанного с периодическими гидроиспытаниями и продувкой кармана холодной водой, показал, что циклическое нагружение не является основной причиной повреждений в узле. Для обоснования допустимости эксплуатации парогенераторов с такими повреждениями создан расчетный метод, позволяющий в НУЭ, а также при гидравлических испытаниях, прогнозировать кинетику роста



*Рис.* 12. Распределения суммарных напряжений, вызванных действием рабочего давления при НУЭ и остаточных технологических напряжений, по толщине стенки патрубка ПГ в зоне сварного соединения № 111 на высоте стенки кармана z = 50 мм от его дна в различных сечениях по  $\varphi$  ( $\varphi = 0$  соответствует самой малой длине патрубка,  $\varphi = 3,14$  – самой большой): a – окружная;  $\delta$  – осевая компонента (1 - 0 рад; 2 - 0,78; 3 - 1,57; 4 - 2,35; 5 - 3,14)

характерных размеров полуэллиптической трещины (рис. 13), имитирующей рассматриваемый дефект. Разработанный расчетный метод основан на достижениях современной механики разрушения конструкционных материалов с несплошностями трещинообразной формы и эффективном применении соответствующих подходов для прогнозирования поведения таких несплошностей в различных условиях нагружения в весьма ответственных конструкциях, в том числе и в атомной энергетике [16–18].

Поскольку обнаруживаемые дефекты несплошности в узлах приварки коллектора к патрубку Ду 1200 парогенераторов ПГВ-1000М относятся к поверхностным дефектам (на внутренней поверхности), то для них приемлемо описание как для полуэллиптических трещин. Для полуэллиптической трещины, имитирующей рассматриваемый дефект, характерными являются следующие размеры (см. рис. 13): a – по глубине и 2c – вдоль поверхности. Коэффициенты интенсивности напряжений  $K_i$  в точках D и G рассматриваемого дефекта (полуэллиптической трещины) могут быть рассчитаны в соответствии с рекомендациями [16, 18] с учетом информации относительно распределения напряжений по толщине узла приварки коллектора к патрубку.

Развитие коррозионной трещины во времени t осуществляется путем последовательного прослеживания изменения начальных размеров  $c_0$  и  $a_0$  на основе зависимости скорости роста коррозионной трещины  $v_m$  от величины  $K_1$  в точках D и G. Зависимость  $v_m$  ( $K_1$ ) может приниматься по диаграмме статической коррозионной трещиностойкости материала (рис.14), где условно выделены две зоны: первая  $K_1 < K_{ISCC}$  – зона роста трещины по механизму анодного растворения и вторая  $K_1 > K_{ISCC}$  – зона роста по механизму водородного охрупчивания. Упрощенная диаграмма определяется кривой 2, которую можно приближенно описать в виде:

$$v_m = 0$$
, при  $K_1 < K_{ISCC}$ ;  
 $v_m = v_{max}$  при  $K_1 > K_{ISCC}$ .

За время  $\Delta t$  приращение размера  $\Delta a(t)$  и  $\Delta c(t)$  определяется условием:



Рис. 13. Схематизация обнаруженной несплошности на внутренней поверхности узла приварки коллектора к патрубку Ду 1200 парогенераторов ПГВ-1000М полуэллиптической трещиной



*Рис.* 14. Диаграммы статической коррозионной трещиностойкости конструкционного материала: 1 – диаграмма lg v–  $K_1$  по экспериментальным данным, 2 – идеализированная диаграмма

$$\begin{split} \Delta a(t) &= v_{m} \Delta t, \text{ если } K_{I}(G, t) > K_{ISCC}; \\ \Delta a(t) &= 0, \text{ если } K_{I}(G, t) < K_{ISCC}; \\ a(t + \Delta t) &= a(t) + \Delta a(t); \\ \Delta c(t) &= v_{m} \Delta t, \text{ если } K_{I}(D, t) > K_{ISCC}; \\ \Delta c(t) &= 0, \text{ если } K_{I}(D, t) < K_{ISCC}; \\ c(t + \Delta t) &= c(t) + \Delta c(t). \end{split}$$
(1)

Зависимости (1) используются для отрезка времени  $0 \le t \le t_k$ , где  $t_k$  – ресурс безопасной эксплуатации, определяемый условием отсутствия течи, т.е.  $a(t_k) \le 70$  мм  $\approx 0.95$  δ.

Условие спонтанного роста (нарушение равновесия) такой трещины можно определить на основе двухпараметрического критерия [17, 19, 20].

Согласно этому подходу равновесие трещины не нарушается, если соблюдается условие

$$K_r \le f_1(L_r), \tag{2}$$

где  $K_r = K_1/K_c$  – отношение интенсивности напряжений  $K_1$  в вершине трещины к критическому значению этой величины  $K_c$ ;  $L_r = \sigma_{ref}/\sigma_{T}$  – отношение, определяющее риск вязкого разрушения по механизму пластической неустойчивости;  $\sigma_{ref}$  – напряжение, рассчитываемое только от силового нагружения. Вид функции  $f_1(L_r)$  определяется экспериментально. На рис. 15 приведены такие данные [17] для различных конструкционных сталей, в том числе и для корпусной стали (кривая 2).

В соответствии с экспериментальными данными кривая предельного состояния (критерий спонтанного хрупко-вязкого разрушения) описывается следующим уравнением [17]:

$$K_{r}n = \left[1 - 0.14(L_{r}n)^{2}\right] \left[0.3 + 0.7\exp(-0.65L_{r}^{6}n^{6})\right],$$
  
при  $L_{r} < L_{r}^{\max} = \frac{\sigma_{T} + \sigma_{B}}{2\sigma_{T}},$  (3)

 $K_r = 0 \, \Pi P H \, L_r > L_r^{\text{max}}$ 

где *n* – искомое значение коэффициента безопасности, определяющего отношение предельных нагрузок к действующим, для указанного разрушения.

Условия допустимости несплошностей, выявленных в узле приварки коллектора к патрубку



Рис. 15. Диаграммы предельного состояния  $K_r \leq f_1(L_r)$  для конструкционных сталей разного типа [16]: 1 – высокопрочная сталь EN408; 2 – сталь для сосудов давления A533B; 3 – низкоуглеродистая сталь с марганцем; 4 – аустенитная сталь; 5 – расчетная кривая

Ду 1200 парогенераторов ПГВ-1000М, при дальнейшей эксплуатации на период  $t_k$  до следующего ППР:

- глубина трещины  $a(t_k)$  не достигнет величины 70 мм (0,95  $\delta$ );

- коэффициент безопасности против спонтанного роста трещины не снизится ниже предельно допустимого значения n > 2,0.

Точность прогнозирования роста во времени полуэллиптической коррозионной трещины, имитирующей рассматриваемый дефект, зависит от выбора параметров К<sub>ІSCC</sub> и v<sub>m</sub> диаграммы статической коррозионной трещиностойкости. Для повышения точности прогнозных оценок необходимо получение экспериментальных данных непосредственно для стали 10Г2НМФА при НУЭ с учетом особенностей водно-химического режима второго контура в зоне кармана. До тех пор, пока не получены достоверные экспериментальные данные, при выборе величин указанных параметров целесообразно опираться на литературные данные, например [21, 22], полученные для близких по составу сталей, а также на данные наблюдений за ростом аналогичных дефектов на АЭС Украины и России.

Данные [21] показывают, что для стали A533B (20MnMoNi55) в воде при температуре 288 °С среднее значение скорости роста коррозионной трещины для реакторов типа PWR соответствует приблизительно  $v_m = 10^{-9}$  м/с = = 31,5 мм/год.

На основе обработки экспериментальных дефектограмм коррозионных трещин в зоне сварного соединения № 111-1 1ПГ-1 и 1ПГ-2 Южно-Украинской АЭС [11] получены уточненные параметры  $K_{\rm ISCC}$  и  $v_m$  для идеализированной диаграммы:  $K_{\rm ISCC} = 10$  МПа·м<sup>1/2</sup> и  $v_m = 44$  мм/год, которые можно с определенным консерватизмом использовать для прогноза поведения рассматриваемой трещины в зоне соединения № 111 парогенераторов других АЭС.

# ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

Разработанная «Методика оценки допустимости несплошностей, выявленных в узле приварки коллектора к патрубку Ду 1200 парогенераторов ПГВ-1000М» (МТ-Т.0.03.308-14) устанавливает порядок и процедуру выполнения расчетного обоснования допустимости несплошностей, выявленных в УСКП Ду 1200 парогенераторов ПГВ-1000М, при дальнейшей эксплуатации на период до следующего ППР.

Апробация Методики была проведена при выполнении работ по определению напряженного состояния и оценке работоспособности после ремонта сварного соединения № 111/1 1ПГ-1, 1ПГ-2 ОП ЮУ АЭС (2004 г.), по расчету постулируемого дефекта для допуска к дальнейшей эксплуатации сварного соединения № 111/1 4ПГ-3 ОП ЗАЭС по результатам контроля (2006–2010 гг.), по прочностному расчету сварных соединений приварки «холодных» коллекторов к патрубкам Ду 1200 парогенераторов 3ПГ1–3ПГ4 блока № 3 ОП РАЭС (2009–2011 гг.).

Южно-Украинская АЭС. В 2001–2002 гг. на парогенераторах 1ПГ-1 и 1ПГ-2 энергоблока № 1 ОП ЮУАЭС были обнаружены несплошности металла, идентифицированные как продольные относительно сварного шва № 111 трещины. После выполнения ремонта путем выборки и заварки металла дефектных участков были выявлены многочисленные поперечные трещины.

В 2004 г. были выполнены работы по определению напряженного состояния и оценке работоспособности после ремонта сварного соединения №111/1 1ПГ-1, 1ПГ-2 ЮУ АЭС. Необходимость в таком прогнозировании была связана с обоснованием технологии ремонта, а главное, с получением данных по остаточным напряжениям, на основе которых необходимо было выполнить оценку работоспособности сварного соединения № 111/1 после ремонта.

Результаты прогнозирования показали, что при сварке (заполнении выборки) перед промежуточным и окончательным отпуском формируется напряженное состояние, когда преобладают окружные напряжения  $\sigma_{\beta\beta}$  по величине. Уровень этих напряжений в зоне выборки 250...260 МПа на внутренней поверхности и 440 МПа на наружной. В периферийной зоне сварного шва соответственно ~ 300 и ~ 270 МПа. Высокий отпуск с местным нагревом до 650 °С практически полностью релаксирует сварочные остаточные напряжения, но после охлаждения возникают новые остаточные напряжения также с преобладанием по величине окружных напряжений  $\sigma_{\beta\beta}$ , уровень которых при 20 °С в зоне выборки 180...210 МПа на внутрен-



Рис. 16. Дефектограмма УЗК ПГ № 3 блок № 4 ЗАЭС

ней поверхности и 240...260 МПа на наружной. В периферийной зоне сварного шва соответственно 200...225 и 200...250 МПа.

Для оценки работоспособности была принята концепция образования и развития в зоне сварного соединения № 111/1 коррозионных трещин под напряжением. Нагружение рабочей равномерной температурой ~300 °С и соответствующим давлением в коллекторе и корпусе приводит к небольшому увеличению указанных напряжений, т. е. сохраняет заметное преобладание окружных напряжений, что предопределяет достаточно высокий риск образования поперечных коррозионных трещин, аналогично тому, что имело место после первого ремонта. Учитывая достаточно высокие пластические свойства основного материала и материала сварных швов, можно не опасаться хрупких разрушений, связанных с рассматриваемыми коррозионными трещинами. В свете изложенного и, учитывая опыт предыдущего ремонта, была рекомендована эксплуатация отремонтированного сварного соединения с периодическим обследованием не реже одного раза в год.

Запорожская АЭС. Во время ППР в 2005 г. УЗК сварного соединения № 111-1 парогенератора ПГ-3 энергоблока № 4 ОП ЗАЭС показал, что на месте обнаруженной ранее несплошности в виде цепочки отдельных, близко расположенных несплошностей высотой примерно 3...4 мм и длиной около 60 мм образовался дефект с измеряемыми характеристиками, превышающими значения, установленные МЦУ-11-98п и [4], и в соответствии с п. 6.6 МЦУ-11-98п и [4], и в соответствии с п. 6.6 МЦУ-11-98п, этот дефект имеет признаки трещинообразного дефекта высотой 40 мм и протяженностью ~ 90 мм (рис. 16, 17).

Учитывая значительный прогресс в механике разрушения тел с трещинами и применения соответствующих ее подходов к прогнозированию работоспособности различных конструкций, в том числе и в атомной энергетике, была выполнена работа по расчету постулируемого дефекта для допуска к дальнейшей эксплуатации сварного соединения №111/1 ПГ-3 энергоблока № 4 ОП ЗАЭС.



Рис. 17. Картограмма расположения несплошности № 3 сварного соединения № 111/1 (горячий коллектор) ПГ-3 энергоблока № 4 ОП ЗАЭС по результатам данных Экспертного заключения ФГУП «ЦНИИТМАШ» от 13.01.2006 г.

Задачей работы была оценка современными средствами механики разрушения работоспособности сварного соединения № 111/1 парогенератора 4ПГ-3 с указанным дефектом на период до ППР-2006.

Результаты выполненных расчетных исследований показали следующее:

– в зоне рассматриваемого дефекта действуют рабочие напряжения  $\sigma_{zz}$  (направление z соответствует нормали к плоскости дефекта), переменные по толщине с максимальными значениями ~53 МПа на поверхности кармана в зоне трещины и 10 МПа на свободной наружной поверхности;

– кроме напряжений от внешней нагрузки следует учитывать остаточные напряжения, связанные с выполнением сварного шва № 111/1 и высоким отпуском после сварки. Уровень этих напряжений от 77 до –56 МПа на поверхности в кармане и наружной поверхности в зоне дефекта;

– развитие рассматриваемого дефекта во времени (рис. 18, 19) на основе современных подходов механики разрушения тел с трещинами в коррозионной среде, выполненное с привлечением упрощенной, достаточно консервативной диаграммы статической коррозионной трещиностойкости стали 10ГН2МФА, полученной при обработке дефектограмм аналогичных соединений в парогенераторах 1ПГ-1 и 1ПГ-2 Южно-Украинской АЭС, дает основание предсказывать безопасную эксплуатацию по условию появления течи сварного соединения № 111-1 4ПГ-3 ЗАЭС с поверхностным трещинообразным дефектом 40×90 мм на период один год;

– показано, что при гидроиспытаниях парогенератора 4ПГ-3 ЗАЭС перед запуском, а также в процессе эксплуатации риск спонтанного роста развивающейся по коррозионному механизму рассматриваемой трещины полностью исключается.

Эти результаты послужили основой для получения разрешения на пуск энергоблока № 4 ЗАЭС в эксплуатацию с проведением в середине 2006 г. контрольных измерений размеров дефекта. Результаты таких измерений показали, что размеры дефекта увеличились незначитель-



*Рис. 18.* Прогноз кинетики роста во времени *t* исходной трещины  $a_0 = 40$  мм,  $c_0 = 45$  мм для 4ПГ-3 ЗАЭС при  $K_{\rm ISCC} = 10$  МПа·м<sup>1/2</sup> и  $v_m = 44$  мм/год

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ



*Рис. 19.* Кинетика уменьшения коэффициента запаса против спонтанного роста трещины  $a_0 = 40$  мм,  $c_0 = 45$  мм во времени при  $K_{\rm ISCC} = 10$  МПа·м<sup>1/2</sup>

но по сравнению с начальными значениями. Такое расхождение с прогнозом связано с большим консерватизмом исходных данных для расчета относительно стойкости материала сварного соединения к росту коррозионных трещин в среде питательной воды ЗАЭС.

Естественно, что имело основание предполагать, что в период последующих ППР контрольные замеры рассматриваемого дефекта дадут величины, далекие от критических, т. е. будут основания отказаться от весьма затратного ремонта соединения.

В этой связи был выполнен расчет постулируемого дефекта для допуска к дальнейшей эксплуатации сварного соединения № 111-1 ПГ-3 энергоблока № 4 ОП ЗАЭС. Задача расчета – определить диапазон возможных сочетаний ожидаемых размеров рассматриваемого дефекта, при которых возможен допуск к дальнейшей эксплуатации парогенератора ПГ-3 энергоблока № 4 ЗАЭС.

Результаты работы показали:

1. Парогенераторы типа ПГВ-1000М М могут быть допущены в безопасную эксплуатацию при обнаруженных в зоне сварного соединения № 111 коррозионных трещинах при следующих условиях:

– размеры  $a_0$  и  $c_0$  окружных поверхностных трещин не превышают указанных в табл. 1;

– размеры поверхностных трещин вдоль образующей кармана (поперек сварного шва)  $a_0$  и  $c_0$  не превышают указанных в табл. 2;

 – очередной контроль размеров указанных дефектов не позже одного года.

2. Если размеры дефектов превышают указанные в табл. 1 и 2, то, учитывая консервативность полученных результатов и высокую стоимость ремонта, заслуживает внимания проведение более прецизионных оценок на основе экспериментальной диаграммы статической коррозионной трещиностойкости материала в зоне сварного соединения № 111, для чего требуется проведение соответствующих экспериментальных исследований.

На основании результатов прогноза и результатов периодического контроля сварного соединения № 111/1 эксплуатация парогенератора 4ПГ-3 ОП ЗАЭС продлевалась в 2007–2010 гг. Размеры обнаруженной несплошности за указанный период практически не изменились, что свидетельстсвует о консервативности принятых в расчете характеристик трещиностойкости материала сварного соединения № 111. В 2011 г. после аварии на АЭС «Фукусима» был произведен ремонт данного сварного соединения. Вырезка темплета дефектного участка при ремонте подтвердила наличие коррозионной трещины соответствующих размеров.

Ривненская АЭС. В 2009 г. на энергоблоке № 3 ОП «Ривненская АЭС» при контроле состояния парогенераторов ПГ-1–ПГ-4 в зоне сварных соединений № 111/2 холодный коллектор были обнаружены несплошности вдоль оси шва, картограмма одной из них приведена на рис. 20. Характерной особенностью этих несплошностей является их многоочаговый характер (3–6 очагов

Т а б л и ц а 1. Результаты расчета долговечности *t<sub>k</sub>* (в годах) безопасной работы сварного соединения № 111/1 с рассматриваемым дефектом (окружная трещина) в зависимости от постулируемых размеров *a*<sub>0</sub> и 2*c*<sub>0</sub> по результатам контроля (*v<sub>m</sub>* = 44 мм/год)

	<i>а</i> <sub>0</sub> , мм									
2 <i>с</i> <sub>0</sub> , мм	40	45	50	55	60	40	45	50	55	60
	$K_{\rm ISCC} = 10 \text{ M}\Pi a \cdot m^{1/2}, n \ge 2,9$						$K_{\rm ISCC} = 1$	5 МПа∙м <sup>1/2</sup> ,	$n \ge 2,78$	
90	1,845	1,849	1,847	1,845	1,849	2,649	2,654	2,651	2,649	2,653
100	1,732	1,736	1,733	1,731	1,733	2,536	2,540	2,538	2,535	2,540
110	1,618	1,622	1,620	1,618	1,622	2,422	2,426	2,424	2,422	2,426
120	1,505	1,508	1,506	1,504	1,508	2,309	2,313	2,310	2,308	2,312
130	1,391	1,395	1,393	1,390	1,394	2,195	2,199	2,197	2,194	2,199
140	1,277	1,281	1,279	1,277	1,281	2,081	2,086	2,083	2,081	2,085
150	1,164	1,167	1,165	1,163	1,167	1,968	1,972	1,970	1,967	1,971
160	1,050	1,054	1,052	1,049	1,053	1,854	1,858	1,856	1,853	1,858

		а <sub>0</sub> , мм											
<i>с</i> <sub>0</sub> , мм	10		15		20		25		30				
	<i>t<sub>k</sub>,</i> год	$n(t_k)$	<i>t<sub>k</sub>,</i> год	$n(t_k)$	<i>t</i> <sub><i>k</i></sub> , год	$n(t_k)$	<i>t<sub>k</sub>,</i> год	$n(t_k)$	<i>t<sub>k</sub>,</i> год	$n(t_k)$			
10	1,284	2,0	-	-	-	-	-	-	-	-			
15	1,256	2,0	1,170	2,0	-	-	-	-	-	-			
20	1,232	2,0	1,143	2,0	1,056	2,0	-	-	-	-			
25	1,210	2,0	1,113	2,0	1,029	2,0	0,943	2,0	-	-			
30	1,166	2,0	1,097	2,0	1,005	2,0	0,915	2,0	0,829	2,0			

Таблица 2. Результаты прогнозирования поведения коррозионной поперечной (вдоль образующей) трещины по величинам  $t_k$  и  $n(t_k)$  в зависимости от сочетания  $a_0$  и  $c_0$ 



*Рис. 20.* Картограмма несплошности для парогенератора ПГ-1 при  $a_0=25$  мм,  $2c_0=1155$  мм

по длине несплошности), что определяет достаточно большую длину выявленных несплошностей вдоль сварного шва. Наиболее вероятным является механизм коррозионного зарождения, роста и слияния этих дефектов под действием эксплуатационных и остаточных напряжений в зоне сварного соединения при наличии соответствующей агрессивной среды в кармане узла соединения коллектора с патрубком.

С участием специалистов ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины была выполнена работа по прочностному расчету сварных соединений приварки холодных коллекторов к патрубкам Ду 1200 парогенераторов ЗПГ1–ЗПГ4 блока №3 ОП РАЭС, задачей было определение степени опасности выявленных несплошностей и возможности допуска к дальнейшей эксплуатации блока на срок до одного года с целью соответствующей подготовки АЭС к их ремонту. Результаты расчетов (табл. 3 и рис. 21) дали основание предсказать безопасную эксплуатацию парогенераторов энергоблока № 3 ОП РАЭС с имеющимися в сварных соединениях № 111/2 отражателями на период в течение одного года, т. е. до следующего ППР 2010 г.

Результаты УЗК сварных соединений № 111/2 парогенераторов ЗПГ1–ЗПГ4 энергоблока № 3 РАЭС, проведенного в период ППР 2012 г. по методике МЦУ-11-98п с изменениями № 1 показали, что характеристики выявленных отражателей (размеры несплошностей) по сравнению с результатами контроля в ППР 2009 г. и ППР 2010 г. развития не имеют.

В то же время, по результатам расчетов, размеры отражателей, которые консервативно рассматривались как коррозионные трещины, за этот период эксплуатации должны были заметно увеличиться. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ



Рис. 21. Результаты расчета кинетики роста трещины и изменения коэффициента запаса за 1 год для парогенератора ПГ-1  $(a_0 = 25 \text{ мм}, 2c_0 = 1155 \text{ мм}), 2c - длина, а - глубина отражателей (полуэллиптических трещин в расчете); n - коэффициент запаса с позиций риска спонтанного развития трещины.$ 

Таблица 3. Результаты расчета развития окружных трещин, постулируемых на внутренней поверхности в зоне сварных соединений № 111/2

Номер	Исход	ные дані	ные	Через 1 год			
ПГ	2с, мм	а, мм	п	2с, мм	а, мм	п	
3ПГ-1	1155	25	3,73	1243	69	2,01	
3ПГ-2	280	5	7,57	335	49	3,86	
3ПГ-3	790	5	7,49	845	49	2,74	
3ПГ-4	855	10	5,70	920	54	2,60	

Возможно, что отражатели большой длины, но малой глубины, являются несплошностями утонения канавочного типа, а не коррозионными трещинами. Скорость роста дефектов утонения канавочного типа обусловлена в основном механизмом анодного растворения и значительно ниже (обычно не превышает 1–2 мм/год), чем скорость роста трещиноподобных коррозионных дефектов.

Таким образом, опыт эксплуатации сварных соединений приварки холодных коллекторов к патрубкам Ду 1200 парогенераторов 3ПГ1–3ПГ4 блока № 3 ОП РАЭС с выявленными в 2009, 2010, 2012 гг. отражателями указывает на наличие более высоких коэффициентов запаса с позиций риска спонтанного развития трещин, консервативно постулированных в прочностном расчете сварных соединений приварки холодных коллекторов к патрубкам Ду 1200 парогенераторов 3ПГ1–3ПГ4 блока № 3 ОП РАЭС 2009 г.

На основании результатов выполненного расчетного прогнозирования поведения выявленных несплошностей и периодического их контроля эксплуатация сварных соединений приварки холодных коллекторов к патрубкам Ду 1200 парогенераторов 3ПГ1–3ПГ4 блока № 3 ОП РАЭС продлевается до настоящего времени.

Таким образом, накопленный опыт по обоснованию безопасной эксплуатации семи сварных соединений № 111 на различных АЭС Украины с обнаруженными несплошностями показал, что современные расчетные подходы механики разрушения тел с трещинами в коррозионной среде, которые нашли применение в «Методике оценки допустимости несплошностей, выявленных в узле приварки коллектора к патрубку Ду 1200 парогенераторов ПГВ-1000М», МТ-Т.0.03.308-14 позволяют с достаточным консерватизмом прогнозировать поведение таких несплошностей как коррозионных трещин под напряжением с учетом сложного характера распределения в зоне несплошностей эксплуатационных напряжений и остаточных сварочных напряжений, возникающих при изготовлении или ремонте. Во всех случаях расчетного обоснования продления безопасной эксплуатации указанные сварные соединения № 111 в дальнейшем эксплуатировались без каких-либо аварийных ситуаций и после проведения необходимой подготовки были отремонтированы (1ПГ-1, 1ПГ-2 ОП ЮУ АЭС, 4ПГ-3 ОП ЗАЭС), либо продолжают эксплуатироваться до сих пор  $(3\Pi\Gamma 1 - 3\Pi\Gamma 4 \text{ O}\Pi \text{ PA} )$ .

#### Выводы

Учитывая актуальность проблемы повреждаемости узла сварного соединения № 111 коллектора к патрубку Ду 1200 парогенераторов ПГВ-1000М, в НПО «ЦНИИТМАШ» и ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины ведутся работы по разработке эффективных методов УЗК указаного узла и соответствующих подходов оценки допустимости выявленных несплошностей.

Разработанная специалистами НПО «ЦНИИТ-МАШ» «Методика ультразвукового контроля узла приварки коллектора к парогенератору ВВЭР-1000» (МЦУ-11-98п) предназначена для контроля металла узла соединения коллектора с патрубком Ду 1200 парогенератора ПГВ-1000М и позволяет эффективно выявлять дефектные зоны.

Для обоснования работоспособности узла соединения коллектора с патрубком в случае повреждений разработана «Методика оценки допустимости несплошностей, выявленных в узле приварки коллектора к патрубку Ду 1200 парогенераторов ПГВ-1000М» (МТ-Т.0.03.308-14). Методика позволяет обосновать допустимость дефектов (несплошностей) при эксплуатации узла до следующего планового ремонта.

Апробации разработанных методик были успешно проведены на АЭС России и Украины. Регулярная диагностика этого узла современными методами УЗК и оперативная оценка степени опасности обнаруженных дефектов на текущий момент и на момент следующего планового контроля, уже сегодня позволяет существенно снизить объемы работ по ремонту и замене дефектных парогенераторов при обеспечении необходимой безопасности эксплуатации АЭС.

- 1. ОП 1513–72. Основные положения по сварке и наплавке узлов и конструкций атомных электростанций, опытных и исследовательских ядерных реакторов и установок. М.: Энергоатомиздат, 1985
- ПК 1514–72. Правила контроля сварных соединений и наплавки узлов и конструкций атомных электростанций, опытных и исследовательских ядерных реакторов и установок. – М.: Энергоатомиздат, 1985
- ПНАЭ Г-7-009–89. Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварка и наплавка. Основные положения. – М.: Энергоатомиздат, 1990
- ПНАЭ Г-7-010–89. Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварные соединения и наплавки. Правила контроля. – М.: Энергоатомиздат, 1990 г.
- 5. ПНАЭ Г-7-030-91. Унифицированные методики контроля основных материалов (полуфабрикатов), сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов, атомных энергетических установок. Ультразвуковой контроль. Часть II. Контроль сварных соединений и наплавки. (Утв. Постановлением Госпроматомнадзора СССР от 31 окт. 1991 г. № 14). – Введ. 1 окт. 1992
- 6. ГОСТ 14782-86. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые.
- ОСТ 108.004.108–80. Соединения сварные и наплавки оборудования атомных электростанций. Методы ультразвукового контроля. Отраслевой стандарт, 1981
- ПНАЭ Г-7-030–89. Контроль неразрушающий. Ультразвуковой контроль сварных соединений и наплавок. Методика контроля.
- 9. *КТА 3201.4*. Компоненты первого контура легководных реакторов. Германия, 1982 г.
- Особенности НДС приварки коллектора к патрубку парогенератора ПГВ-1000М АЭС при эксплуатации и ремонте / Г. А. Степанов, В. В. Харченко, А. И. Бабуцкий и др. // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин / За ред. Б. Є. Патона. – Київ: ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАНУ, 2006. – С. 181–184.
- Махненко В. И. Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций. – Киев: Наук. думка, 2006. – 618 с.
- Махненко В. И. Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций. – Киев: Наук. думка, 1976. – 320 с.

- Numerical Methods for the Prediction of Welding Stresses and Distortions / V. I. Makhnenko, E. A. Velikoivanenko, V. E. Pochinok et al. // Welding and Surfacing Reviews. – 1999. – V. 13 – 148 p.
- 14. Расчетно-экспериментальное исследование сварочных напряжений в зоне кольцевых стыков трубопроводов ДУ-300 КМПЦ ЧАЭС-3 / В. И. Махненко, О. Г. Касаткин, Е. А. Великоиваненко, В. М. Шекера // Сб. тр. 5-й Междунар. конф. «Материаловедческие проблемы при проектировании и эксплуатации оборудования АЭС». – 1998. – Т. 2. – С. 53–66.
- Г. В. Степанов, А. В. Широков. Оценка кинетики трещины в сварном шве СШ №111 соединения коллектора с патрубком корпуса парогенератора по русурсу пластичности // Пробл. прочн. –2014. №3. С. 96–105
- 16. Овчинников А. В., Зубченко А. С. Интерполяционные формулы расчета коэффициентов интенсивности напряжений для сосудов давления и трубопроводов // Вопр. атомной науки и техники. Сер. Обеспечение безопасности АЭС. Реакторные установки с ВВЭР. Вопросы прочности. – 2010. – Вып. 27. – С. 58–70.
- 17. *Milne L., Ainsworth R.A., Dowling A.R., Stewart A.T.* Assessment of the integrity of structure containing defects, CEGB R6, Rev. 3, May 1986.
- MP-125-01-90. Расчет коэффициентов интенсивности напряжений и коэффициентов ослабления сечений для дефектов в сварных соединениях. – Киев, 1990. – 55 с.
- Fitness-For-Service, API Recommended Practice 579, First Ed. American Petroleum Institute, Washington, D.C., January 2000.
- R6: Assessment of the integrity of structures containing defects. British Energy Generation Report R/H/R6, Revision 4, 2001.
- Magdowski R., Kraus A., Speidel O. Environmental Degradation Assessment and Life Prediction of Nuclear Pressure Vessels and Piping Steels // Proc. of Int. Symp. On Plant Aging and Life Prediction of Corrodible Structures (15–18 May, 1995, Sapporo, Japan). Sapporo, 1995. P.897–902.
- 22. Влияние воды высоких параметров на склонность стали 10ГН2МФА к замедленному деформационному коррозионному растрескиванию / Ю. Г. Драгунов, А. С. Зубченко, О. Ю. Петрова, И. Л. Харина // Машиностроение и инж. образование. – 2007. – № 4. – С. 35–41.

One of the main problems of safe service of PGV-1000M steam generators is corrosion damage of the assembly of welding header to tube of Dn 1200. Procedures for ultrasonic testing of this assembly and assessment of admissibility of detected defects of discontinuity type are considered. Developed procedures have been tested in a number of Russian and Ukrainian NPP. Their application will allow operative assessment of the degree of criticality of the detected defects and reducing the scope of work on repair and replacement of defective steam generators. 22 references, 3 Tables, 21 Figure.

*Keywords*: *PGV-1000M*, assembly of header to tube joint; stress corrosion cracking, prediction, stress-strain state, semielliptical crack, discontinuity schematization, diagram of static corrosion crack resistance of material

Поступила в редакцию 16.07.2014

# ПУТЕИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС КВ-1П

#### Е. А. ЕРКО, Е. В. ШАПОВАЛОВ, В. А. КОЛЯДА

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

Для контроля геометрических параметров железнодорожной колеи с целью выявления несоответствий нормам содержания различных участков пути, возникающих вследствие повышенной нагрузки на колею и износа рельсов, разработан и изготовлен путеизмерительный комплекс КВ-1П. Он предназначен для измерения ширины колеи и взаимного превышения рельсовых нитей с привязкой к путевой координате. Основные функции путеизмерительного комплекса КВ-1П – измерение геометрических параметров по четырем независимым каналам в процессе контроля состояния пути, сохранение результатов в виде отдельных файлов, графическая индикация результатов измерения с одновременным обнаружением опасных отклонений от норм содержания пути. Библиогр. 6, рис. 5.

Ключевые слова: путеизмерительный комплекс, диагностика, путевое хозяйство

С увеличением скорости и интенсивности движения поездов повышается вероятность возникновения аварийных ситуаций. Для обеспечения безопасности движения поездов крайне важно иметь достоверные данные о геометрических параметрах железнодорожного пути. Периодический контроль геометрических параметров дает возможность объективно оценивать состояние пути, составлять графики ремонта, а также устанавливать скорость движения поездов на конкретных участках [6]. Основным средством контроля геометрии рельсовой колеи являются путеизмерительные вагоны, однако они используются для оценки состояния главных путей, а для контроля железнодорожных путей вспомогательного назначения применяются путеизмерительные тележки. Путеизмерительные тележки предназначены для непрерывного измерения ширины рельсовой колеи и взаимного превышения рельсовых нитей. В отличие от путеизмерительного вагона путеизмерительная тележка проводит измерения без нагрузки на рельсы [1].

Наиболее распространенными моделями путеизмерительных тележек являются ПТС-3М, ПТ-7МК и РПИ ИНФОТРАНС российского производства, тележки немецких фирм «Trimble», «Intermetric» и их швейцарский аналог «Swiss trolley». Тележка модели ПТС-3М принадлежит к механическому типу. Регистрация результатов измерений осуществляется на бумажный носитель с помощью самописцев, данные об отклонениях расшифровываются оператором вручную. В модели типа ПТ-7МК результаты измерения записываются в энергонезависимую память, данные расшифровываются с помощью специального программного обеспечения. Несмотря на автоматизацию процесса обработки данных в ПТ-7МК есть несколько существенных недостатков: низкий уровень защиты от проникновения твердых

предметов и воды - IP42 (защищенность от попадания вертикальных капель воды и предметов диаметром более 1 мм), существенные конструкционные просчеты, влияющие на повторяемость результатов измерения и устойчивость тележки. Тележки РПИ производства Инфотранс дают наименьшую погрешность измерения среди тележек российского производства, однако данные показатели значительно ухудшаются в сложных погодных условиях. Из-за большой поверхности соприкосновения колес РПИ с рельсами может происходить налипание снега, что на порядок увеличивает погрешность измерения. Среди прочих недостатков РПИ можно назвать их большую массу – 40 кг в базовой комплектации и необходимость обслуживания данной тележки тремя сотрудниками.

Современные немецкие путеизмерительные тележки в большинстве своем являются однотипными. Среди типичных признаков можно назвать использование переносного компьютера в качестве вычислительного блока, контактные методы измерений, использование беспроводных методов передачи данных, приспособленность к разной ширине колеи, использование операционных систем как основы для программного обеспечения, а также привязку как к локальной, так и глобальной системам координат [2]. Тележки часто разборные - на их сборку может потребоваться 10...20 мин, при этом требуется взаимодействие двух работников. Рассматриваются путеизмерительные тележки фирм «Trimble», «Intermetric», «Vogel und Plotscher» и тележки швейцарского производства «Swiss trolley».

В тележках Trimble используется достаточно мощная вычислительная машина Trimble Yuma (1.6 GHz Intel Atom Prozessor, 1 GB DRAM, 32 GB SSD). Эту ЭВМ применяют в системе прежде всего из-за требований модульности, ее можно легко перенастроить на выполнение широкого спектра задач, которые могут требовать больше мощно-

© Е. А. Ерко, Е. В. Шаповалов, В. А. Коляда, 2014

## -ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

стей, нежели рассматриваемая система. В тележках Intermetric и TRIMBLE используются операционные системы общего назначения, что может крайне негативно влиять на время срабатывания датчиков и синхронизацию измерений. Как преимущество тележек Intermetric можно рассматривать привязку данных к глобальной системе координат с помощью GPS. Существенными преимуществами путеизмерительных тележек Swiss Trolley являются их модульность и температурная стабильность каждого отдельного модуля. Каждый измерительный канал выделен в отдельный блок, который может быть использован в других системах. Модульность системы также дает возможность быстрой замены отдельных блоков в случае поломки. Путеизмерительные тележки производства «Vogel und Plotscher» сложны в настройке и использовании, однако применение операционных систем реального времени дало возможность повысить точность синхронизации данных. Отсутствие графического отображения результатов измерения компенсируется выводом информации в виде документов Excell с выделенными полями значений, которые превышают допустимые параметры.

Одними из наиболее существенных недостатков немецких и швейцарских тележек, которые



*Рис. 1.* Тележка путеизмерительная КВ-1П на испытательном стенде

препятствуют их внедрению в путевое хозяйство Украины, являются габариты в собранном состоянии и масса путеизмерительных комплексов. Использование тележек в Украине предполагает работы в перерывах между движением поездов, что существенно повышает требования ко времени подготовки комплекса к работе и снятия тележки с пути [3].

В ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины разработан путеизмерительный комплекс КВ-1П (рис. 1), оснащенный электронным блоком регистрации данных. Путеизмерительный комплекс включает тележку, измерительную систему, испытательный стенд, а также программное обеспечение.

Путеизмерительное оборудование комплекса снабжено датчиком пройденного пути, датчиком уровня и датчиком ширины рельсовой колеи. Датчик пройденного пути определяет величину и направление перемещения тележки, а также выдает синхронизирующие импульсы для остальных датчиков тележки с шагом 0,25 м по координате пути. Опционально тележка может оснащаться GPS приемником [3, 4].

Для регистрации, анализа и индикации показаний датчиков используется микропроцессорный контроллер (МК), оснащенный жидкокристаллическим дисплеем и клавиатурой. МК имеет энергонезависимую память. Для питания электронной аппаратуры используются автономные аккумуляторные батареи.

Аппаратно-программное обеспечение МК (рис. 2) можно условно разделить на блок регистрации результатов измерений, блок обнаружения отклонений параметров пути от заданных норм, блок цифровой индикации и графической визуализации значений регистрируемых параметров пути, а также блок сохранения результатов измерения параметров пути.

Блок автоматической регистрации результатов измерений выполняет регистрацию каждого из измеряемых параметров пути, синхронизированных по единой координате.



Рис. 2. Структурная схема системы измерения параметров колеи

# ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

Блок обнаружения отклонений параметров пути от заданных норм осуществляет анализ и сравнение результатов измерения параметров пути с паспортными данными участка, установленными для данного участка пути, после чего направляет найденные отклонения в блок энергонезависимой памяти МК [5, 6].

Блок энергонезависимой памяти фиксирует результаты измерений, поступающих из блока автоматической регистрации измерений; предварительно установленные паспортные нормы участка пути; выявленные отклонения от норм содержания пути; параметры объектов инфраструктуры рельсового пути, находящихся на контролируемом участке. Блок цифровой индикации и графической визуализации обеспечивает графическое отображение результатов обработки и анализа всех параметров пути на экране дисплея в реальном времени непосредственно на месте замеров, включая обнаруженные неисправности пути.

Устройство управления программным обеспечением МК обрабатывает введенные оператором начальные параметры настройки путеизмерительного оборудования, осуществляет выбор режимов работы путеизмерительного оборудования, управление выбором информации из блока регистрации измерений и его вывод на дисплей устройства визуализации. Интерфейс связи МК использует-



Рис. 3. Алгоритм работы программного обеспечения путеизмерительной тележки

## -ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

ся для передачи данных из энергонезависимого блока памяти в компьютер предприятия путевого хозяйства или в компьютерную базу данных департамента пути и сооружений управления железной дороги. Интерфейс двусторонней связи с внешним компьютером или компьютерной базой данных обеспечивает удобный и универсальный обмен результатами измерений и анализа параметров пути. Структурная схема системы измерения параметров колеи изображена на рис. 2.

Работает путеизмерительный комплекс согласно следующему алгоритму (рис. 3) [3, 4].

После включения энергопитания от автономных аккумуляторных батарей происходит загрузка программами начальной установки для инициализации внутренних и внешних интерфейсных устройств, осуществляя тем самым подготовку к работе. С устройства управления программным обеспечением вводятся начальные параметры настройки путеизмерительного оборудования.

Все операции по настройке контролируются оператором путеизмерительного комплекса на экране блока цифровой индикации и графической визуализации. После ввода начальных параметров контролируемого участка выполняется одновременно их контроль и анализ.

С момента начала движения путеизмерительного комплекса с датчика пройденного пути через одинаковые расстояния (0,25 м) поступают синхронизирующие сигналы. Результаты измерений передаются в блок автоматической регистрации измерений, из которого они поступают в блок памяти. В блоке памяти находятся также наперед заданные нормы содержания данного участка пути. Работа блока обнаружения отклонений параметров пути от заданных норм заключается в том, что из блока памяти поочередно берется пакет данных, соответствующий отрезку пути фиксированной длины и сравнивается с паспортными нормами для данного участка. Результат сравнения передается в блок памяти и одновременно поступает в блок цифровой индикации и графической визуализации.

Устройство управления программным обеспечением, работающее по командам оператора, обеспечивает выбор требуемой информации из блока памяти и вывод на экран блока цифровой индикации и графической визуализации. С помощью устройства управления программным обеспечением осуществляется выбор режима работы путеизмерительного оборудования, а также выбор требуемого пункта меню программного обеспечения.

Полученные после обработки результаты контроля и анализа могут быть переданы для дальнейшей обработки внешним компьютерам, что повышает эффективность использования данного путеизмерительного комплекса за счет принятия оперативных решений по выполнению наиболее важных работ по техническому обслуживанию и ремонту рельсового пути.

Для вторичной (более детальной) автоматизированной обработки результатов измерения, выполняемой на внешнем компьютере, разработано программное обеспечение KvDecoder (рис. 4). Программа позволяет определять следующие отклонения от норм содержания колеи: перекосы и плавные отклонения уровня колеи, расширение и сужение колеи, ненормативные уклоны отвода



Рис. 4. Главное диалоговое окно программного обеспечения KvDecoder

# ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ



Рис. 5. Пример вывода графической информации на экран

превышения внешней рельсовой нити на криволинейных участках пути. При выявлении отклонений автоматически определяется их степень и штрафные баллы, по которым устанавливается качественная оценка каждого километра и участка пути в целом. Предусмотрено автоматическое формирование отчетных документов, таких как графические диаграммы с обозначением выявленных отклонений; таблицы отклонений; ведомости оценки состояния и натурного осмотра колеи. Предусмотрен предварительный просмотр отчетных документов, их сохранение в электронном виде и вывод на печать. Также компьютерная программа имеет диалоговые средства для редактирования свойств участка пути, формирования паспортов колеи, автоматизированного анализа смены состояния колеи со временем и взаимодействия с электронным блоком тележки.

Процесс изготовления тележек практически полностью автоматизирован, что позволяет минимизировать влияние человеческого фактора и получить достаточно высокую повторяемость результатов измерения.

Отдельного внимания заслуживает интерфейс оператора тележки. Была реализована функция записи результатов измерения в отдельные файлы, что упростило навигацию и поиск важной информации, введена возможность внесения оператором отметок о состоянии пути. Одним из главных преимуществ разработанной тележки является вывод на дисплей помимо цифровой еще и графической информации (рис. 5). Существенные неисправности пути определяются в режиме реального времени и также выводятся на экран.

#### Выводы

Разработан путеизмерительный комплекс КВ-1П для контроля геометрических параметров железнодорожной колеи и выявления отклонений параметров от норм содержания пути, который по своим техническим характеристикам, функциям и возможностям не уступает лучшим зарубежным аналогам. Комплекс КВ-1П успешно прошел стендовые и эксплуатационные испытания.

- Путеизмерительная тележка // Железнодорожный транспорт: Энциклопедия / Гл. ред. Н. С. Конарев. – М.: Большая Российская энциклопедия, 1994. – 348 с.
- Маркс К. Л., Лихтбергер Б. Измерение параметров пути с привязкой к системе глобального позиционирования // Железные дороги мира. – 2002. – № 7. – С. 71–75.
- ЦП 0020. Технічні вказівки щодо оцінки стану рейкової колії за показниками колієвимірювальних вагонів. Затвер. Наказом Укрзалізниці № 9-Ц від 17.01.96 р.
- 4. Положення про роботу колієвимірювальних візків ЦП-0265: Затв. Наказом Укрзалізниці від 31.01.2012 № 032-Ц / Мін-во інфраструктури України, Держадміністрація залізничного транспорту України, Укрзалізниця, Головне управління колійного господарства, Державне підприємство Науково-конструкторське технологічне бюро колійного господарства. – Київ.: Поліграфсервіс, 2012.
- Самратов У. Д., Сакович Л. А., Кривдин Д. Г. О точности определения геометрических параметров железнодорожного пути с помощью АПК // Геопрофи. – 2007. – № 6. – С. 28–32.
- Актуальные проблемы выправки и приемки пути после ремонта / А. Я. Коган, К. Б. Ершова, В. В. Петуховский и др. // Путь и путевое хозяйство. – 2007. – № 5. – С. 7–9.

Track-measuring complex KV-1P was designed and manufactured to monitor the geometrical parameters of railway track in order to reveal noncompliance with the norms of maintenance of different track sections, arising as a result of increased load on the track and rail wear. It is designed for measurement of track width and relative excess of trackways with binding to track coordinate. Main functions of tack-measuring complex KV-1P are measurement of geometrical parameters in four independent channels during monitoring of track condition, result storing in the form of individual files, graphic indication of measurement results with simultaneous detection of deviations from track maintenance norms, critical in terms of traffic safety. 6 References, 5 Figures.

Keywords: track-measuring complex, diagnostics, railway equipment

Поступила в редакцию 23.05.2014

# КОНФЕРЕНЦІЯ «СТРАТЕГІЯ РОЗВИТКУ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ УКРАЇНИ»

<u>23 липня 2014 р.</u> на базі ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» відбулася конференція на тему «**Стратегія розвитку системи технічного регулювання України**». Вона була організована Міністерством економічного розвитку і торгівлі України для інформування та підвищення обізнаності представників асоціацій виробників, суб'єктів господарчої діяльності, підприємств, технічних комітетів стандартизації та органів сертифікації щодо приведення законодавства України у сфері технічного регулювання у відповідність з європейськими нормами та правилами.

З доповіддю «Основні завдання щодо приведення національної системи технічного регулювання до міжнародних та європейських норм» виступив директор департаменту технічного регулювання та метрології Мінекономрозвитку України Л. М. Віткін. Він сказав, що з метою усунення всіх наявних розбіжностей між нормативно-правовою базою України та ЄС, що може спричиняти технічні бар'єри у торгівлі, необхідно створити горизонтальне (базове) законодавство. Зокрема, має бути прийнятий новий Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність», який відповідає вимогам Міжнародної організації законодавчої метрології та актам законодавства ЄС з питань метрології. Відповідний законопроект у березні 2014 р. внесений Кабінетом Міністрів України на розгляд Верховної Ради України.

Верховною Радою України 05 червня 2014 р. прийнято Закон України №1315-VII «Про стандартизацію», який набуває чинності з 1 січня 2015 р. Він передбачає добровільне застосування стандартів, скасування інших основоположних законодавчих норм, якими була закріплена можливість безпосередньої обов'язковості стандартів, а також усунення дублювання та надмірного регулювання у цій сфері. Крім того, цим Законом передбачено створення єдиного національного органу з стандартизації, яким має бути визначено державне підприємство з повноваженнями та структурою, що відповідають вимогам європейських організацій стандартизації CEN/CENELEC. Законом також визначено перехідний період для припинення застосування галузевих стандартів. Норми цього Закону створять підґрунтя для приведення практики стандартизації в Україні до вимог ЄС.

Крім того, планується переглянути законодавство у сфері оцінки відповідності, яке буде спрямоване у тому числі на повне приведення законодавства України у відповідність з Угодою ТБТ СОТ, зокрема в частині визнання технічними регламентами будь-яких нормативно-правових актів, що встановлюють обов'язкові вимоги до продукції, та на усунення тих законодавчих положень, які перешкоджають приведенню українських технічних регламентів у відповідність з директивами та регламентами ЄС. У травні 2014 р. внесено на розгляд Верховної Ради України відповідний проект Закону України «Про технічні регламенти та оцінку відповідності».

Істотних змін має зазнати й галузеве законодавство. Приведення українських технічних регламентів у відповідність з європейськими директивами Нового та Глобального підходів (крім тих, що вже приведені у таку відповідність) є однією з ініціатив, які необхідно реалізувати найближчим часом. Прийняття нових горизонтальних (базових) законів та підзаконних актів у сфері технічного регулювання має сприяти приведенню галузевого законодавства України у відповідність з вимогами законодавства ЄС, що в свою чергу вивільнить ресурси органів влади, задіяні в реалізації застарілого законодавства, та збільшить їх потенціал.

В Україні до цього часу продовжує діяти велика кількість дублюючих регуляторних режимів та механізмів контролю продукції до введення її в обіг, а також державного контролю (нагляду) за обігом цієї продукції на ринку. До таких, зокрема, відносяться окремі вимоги санітарного законодавства, законодавства про охорону праці або законодавства у сфері захисту прав споживачів. Таким чином, щоб усунути можливі технічні бар'єри у торгівлі необхідно не лише вдосконалити законодавство у сфері технічного регулювання, але й спрямувати зусилля на усунення дублюючих вимог та на подальше вдосконалення та оптимізацію діяльності органів державної влади.

У разі внесення змін до актів законодавства ЄС необхідно забезпечувати оперативний перегляд актів законодавства України, що розроблені на їх основі. Такий же перегляд повинен здійснюватися у випадку, коли на заміну актів законодавства ЄС, на основі яких розроблені відповідні акти законодавства України, будуть прийняті нові.

Надзвичайно актуальним для застосування технічних регламентів залишається питання опера-

# хроника -

тивного прийняття національних стандартів, що відповідають гармонізованим європейським стандартам та добровільне застосування яких може сприйматися як доказ відповідності вимогам конкретного технічного регламенту.

Система технічного регулювання України характеризується співіснуванням оцінки відповідності згідно з технічними регламентами та обов'язкової сертифікації продукції у державній системі сертифікації УкрСЕПРО. На порядку денному стоїть питання щодо поступової ліквідації цієї системи та завершення переходу до оцінки відповідності згідно з технічними регламентами орієнтовно до 1 січня 2017 р.

На конференції пердставлено багато цікавих та важливих доповідей міністерств, відомств, органів виконавчої влади, технічних комітетів та представників бізнесу, підприємців. Всі вони були об'єднані бажанням подолати технічні бар'єри у торгівлі, щоб якнайшвидше економіка України була інтегрована до зони Європейського Союзу.

Так, керівник групи експертів проекту, фінансованого ЄС, «Додаткові заходи щодо виконання Програми підтримки галузевої політики «Сприяння взаємній торгівлі шляхом усунення технічних бар'єрів у торгівлі між Україною та ЄС» Стефанос Іоакімідіс у своєму виступі сказав: «У нас була постійна співпраця. Вона стала продуктивнішою після 2008 р., коли Україна приєдналася до СОТ, а тепер, після підписання Угоди про асоціацію, співпраця ще більше активізувалася. Наша ціль – допомогти Україні провести необхідні заходи, аби прибрати всі технічні бар'єри, що перешкоджають торгівлі. Для цього в рамках Проекту, реалізацію якого продовжено до 2015 р., передбачена фінансова допомога в розмірі 39 млн євро».

Підводячи підсумки, було наголошено на необхідності подальшого реформування системи технічного регулювання України. Зазначено, що наразі найважливішими завданнями для пришвидчення руху України на євроінтеграційному шляху є: по-перше, необхідність забезпечити українській продукції вільний доступ до світових ринків, по-друге, професійна робота над гармонізацією національних стандартів і регламентів зі світовими (передусім із європейськими), і, по-третє, рішуча боротьба із проявами корупції, яка гальмує роботу й дискредитує країну.

> *Н. В. Троїцька* Ін-т електрозварювання ім. С. О. Патона НАНУ



# 11-я ЕВРОПЕЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ – ГЛАВНОЕ СОБЫТИЕ 2014 ГОДА В МИРЕ НК

С 6 по 10 октября 2014 г. в Праге состоялась 11-я Европейская конференция по неразрушающему контролю, организованная Европейской федерацией по НК и Чешским обществом по НК.

В этом крупнейшем международном форуме по неразрушающему контролю, проходившем в Конгресс-центре столицы Чешской республики, приняли участие около 2000 специалистов из 58 стран.

По традиции к такому масштабному мероприятию, каким является Европейская конференция, стремятся приурочить свои встречи члены различных международных организаций, деятельность которых связана с неразрушающим контролем: Международного комитета по НК (ICNDT), Европейской федерации по НК (EFNDT), Международной академии НК (Academia NDT International – ANDTI), Международной организации по стандартизации (ISO) и др.

Программа конференции была чрезвычайно насыщенной и включала:

- заседания научных секций и стендовые сессии;
- выставку средств НК от ведущих мировых производителей;
- заседание Совета директоров и Генеральную ассамблею EFNDT;
- Генеральную ассамблею ICNDT;
- «День европейской науки», организованный ANDTI совместно с ICNDT;
- заседания технического комитета ISO/TC135 «Неразрушающий контроль» и его подкомитетов по различным методам НК;
- семинары компаний-спонсоров конференции и др. мероприятия.

На открытии конференции с приветственными обращениями к участникам выступили: вице-мэр Праги Vaclav Novotny, президент Академии наук Чешской республики Jiri Drahos, президент Чешского общества по НК и председатель оргкомитета Pavel Mazal, председатель программного комитета конференции Zdenek Prevorovsky, президент ICNDT Mike Farley, президент EFNDT Matthias

# - ХРОНИКА

Purschke, вице-президент EFNDT Peter Trampus, президент Американского общества по НК Roger Engelbart, президент Азиатско-Тихоокеанской федерации по НК Nori Ooka, президент ANDTI Giuseppe Nardoni.



Открытие конференции. На фото – специалисты из 6 стран (слева–направо): президент ICNDT *M. Farley* (Англия), президент Международной академии по НК *G. Nardoni* (Италия), *В. Радько, В. Учанин* (Украина), *А. Поволоцкая* (Россия), *А. Шекеро* (Украина), *О. Василенко* (Россия), председатель ISO/TC 135 *Н. Наtano* (Япония), президент Болгарского общества по НК *М. Миховски, Й. Мирчев* (Болгария), *Е. Путилова* (Россия)

Чтобы представить географию участников конференции, можно обратиться к данным Оргкомитета относительно 790 официальных участников конференции, т. е. специалистов, получивших право участия в заседаниях научных секций и стендовых сессий.



На конференцию подано 670 докладов, из которых научным комитетом отобрано 587 для представления на 37 секционных заседаниях – 450 докладов, и 10 стендовых сессиях – 137 докладов. Наибольшее количество докладов 94 было посвящено исследованиям и разработкам в области УЗ контроля. Они были распределены по трем отдельным секциям: «традиционный» УЗ контроль, УЗ контроль с использованием техники фазированных решеток и дальнодействующий УЗ контроль направленными волнами. Далее идут доклады по направлению «традиционного» радиационного контроля, цифровой радиографии и компьютерной томографии – 54; 40 докладов по магнитному контролю и столько же работы по определению характеристик материалов. Полное представление о тематике включенных в программу конференции докладов Вы можете получить, изучив диаграмму.



Среди авторов наибольшую активность проявили ученые и специалисты по НК из Германии – более 90 докладчиков сделали свои презентации на конференции. Наиболее близки к ним по колличеству докладов коллеги из России, Франции, Чехии и Великобритании.

Хочется отметить украинских специалистов, которые подготовили и представили на конференцию 15 сессионных и стендовых докладов (11 место по количеству докладчиков среди 51 страны, разделенное с Италией).

Ниже приводится список докладов, подготовленных авторами из Украины:

- 1. Б. Е. Патон, В. А. Троицкий, Институт электросварки им. Е. О.Патона НАН Украины. Основные достижения ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины в области неразрушающего контроля.
- В. А. Троицкий, Институт электросварки им.
   Е. О. Патона НАН Украины. Подвижное локальное многонаправленное намагничивание металлических конструкций при магнитопорошковом контроле.
- В. А. Троицкий, Институт электросварки им.
   Е. О. Патона НАН Украины. Флэш-радиография вместо традиционной радиографии с промежуточными носителями информации.
- П. Манорик<sup>1</sup>, А. Шульженко<sup>1</sup>, В. Троицкий<sup>2</sup>, Ю. Посыпайко<sup>2</sup>, А. Кукла<sup>1</sup>, <sup>1</sup>Институт физической химии им. Л.В.Писаржевского НАН Украины, <sup>2</sup>Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины. *Разработка оптоэлектронного сенсорного течеискателя*.
- 5. В. Н. Учанин, Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко НАН Украины. Ин-

ХРОНИКА -

вариантный параметр для оценки эффективности обмоток вихретокового преобразователя.

- 6. G. Nardoni<sup>1</sup>, B. Учанин<sup>2</sup>, P. Nardoni<sup>1</sup>, D. Nardoni<sup>1</sup>, <sup>1</sup>I&T Nardoni Institute (Италия), <sup>2</sup>Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко НАН Украины. Обнаружение поверхностных и подповерхностных дефектов в деталях из ферромагнитных сталей и разработка новых технологий контроля.
- А. Джаганян<sup>1,3</sup>, В. Учанин<sup>2</sup>, А. Опанасенко<sup>1</sup>, Г. Луценко<sup>1,3</sup>, <sup>1</sup>НПФ «Промприлад», <sup>2</sup>Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко НАН Украины, <sup>3</sup>УкрНИИНК. Новый портативный вихретоковый дефектоскоп и примеры использования.
- Д. Афанасьев<sup>1</sup>, В. Учанин<sup>2</sup>, А. Васильев<sup>1</sup>, <sup>1</sup>Донецкий технический университет, <sup>2</sup>Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко НАН Украины. Повышение чувствительности к изменению импеданса обмотки вихретокового преобразователя на основе фазового метода.
- 9. Г. Луценко<sup>1,2</sup>, В. Учанин<sup>3</sup>, В. Мищенко<sup>1</sup>, А. Опанасенко<sup>1</sup>, <sup>1</sup>НПФ «Промприлад», <sup>2</sup>Укр-НИИНК, <sup>3</sup>Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко НАН Украины. *Разработ-ка многоканальных автоматизированных систем контроля на основе применения вихретокового метода*.
- М. Л. Казакевич<sup>1</sup>, А. И. Семенец<sup>2</sup>, В. Я. Дереча<sup>2</sup>, В. М. Казакевич<sup>3</sup>, <sup>1</sup>Институт физической химии им. Л. В. Писаржевского НАН Украины, <sup>2</sup>ГП «АНТОНОВ». Новые сферы применения методов контроля проникающими веществами.
- 11. Г.Я. Безлюдько<sup>1</sup>, Б.Е. Попов<sup>2</sup>, Р.Н. Соломаха<sup>1</sup>, <sup>1</sup>НПФ «Специальные Научные Разработки», <sup>2</sup>Инженерно-консультационный центр «Кран». Оперативный мониторинг усталости металла используя неразрушающий метод коэрцитивной силы. Практические и философские аспекты.
- Ю. В. Куц, А. Г. Протасов, Ю. Ю. Лысенко, А. Л. Дугин, НТУУ «Киевский политехнический институт». Импульсный вихретоковый неразрушающий контроль толщины покрытий.

В научный комитет конференции были включены ученые и специалисты из 44 стан. Украину в нем представляли члены Международной академии по НК – проф. В. А. Троицкий, к.т.н. М. Л. Казакевич и к.т.н. В. Н. Учанин, который был также сопредседателем секции по вихретоковому контролю.

Члены Программного комитета конференции во главе с проф. Zdenek Prevorovsky провели значительную работу по отбору докладов, разделению их по тематическим секциям и планированию заседаний этих секций одновременно в семи залах так, чтобы по-возможности исключить пересечение сессий, потенциальные участники которых могли иметь интерес к нескольким из них.

В выставке оборудования для НК участвовали 135 компаний-экспонентов из 17 стран. Особо хочется отметить, что в число этих стран входила и Украина, производителей средств НК которой представляли НПФ «Промприлад» (г. Киев, директор – Г. Г. Луценко) и НПФ «Специальные Научные Разработки» (г. Харьков, директор – Г. Я. Безлюдько).

НПФ «Промприлад» представила новые портативные вихретоковый (EDDYCON-C) и ультразвуковой (SONOCON-B) дефектоскопы, а также дефектоскоп UD3-71 и сканеры для реализации TOFD технологий.

НПФ «Специальные Научные Разработки» представила коэрцитиметры и приборы для бесконтактного измерения толщины ЭМА методом.

Оба украинских стенда активно и заинтересовано посещались участниками конференции, завязались новые контакты и появились реальные перспективы заключения новых контрактов.

На такой большой выставке трудно выделить какие-то разработки, тем более, что это требует более длительного времени. Отметим только некоторые «изюминки», которые соответствуют профилю работы одного из авторов отчета. Тем более, что эти разработки при таком многообразии экспонатов можно легко пропустить. Нардони институт представил прибор F-SECT фирмы CESI для контроля степени деградации поверхностных слоев лопаток газовых турбин, в котором для многопараметрового контроля реализован переменно-частотный вихретоковый метод (диапазон частот от 600 до 10 МГц). По предварительной договоренности был проведен эксперимент, который показал, что этот прибор позволяет успешно решить актуальную задачу выявления и оценки шлифовочных прижогов (начиная с толщины 3 мкм) на деталях из теплостойких ферромагнитных сталей. Проблемой может быть высокая стоимость этого узкоспециализированного прибора (70 тыс. евро), но полученные результаты могут



стимулировать собственные разработки. Очень актуальны для промышленности Украины разработки американской компании TesTex,Inc. В частности компания предлагает эффективную 8-миканальную низкочастотную (всего 10 Гц) систему для выявления дефектов (в том числе общих и локальных коррозионных повреждений) на внутренней стенке различных труб из ферромагнитных сталей.

Канадская фирма EDDYFI представила серию вихретоковых приборов ECTANE 2. на основе применения многоэлементных (в том числе гибких) преобразователей (аггау probes). В частности, модель ECTANE2-256 позволяет использовать 256 вихретоковых каналов. Гибким многоэлементным вихретоковым преобразователям посвящены также доклады сотрудников фирм Olympus NDT (Канада) и CEA LIST (Франция), что позволяет говорить об определенном заметном тренде.

Украинская компания «Промприлад» была в числе «серебряных» спонсоров конференции и ее логотип очень органично смотрелся рядом с логотипами таких мировых грандов как «GE Measurement & Control», «Helling» и «Institut Dr. Foerster».

Раз уж мы упомянули о спонсорах, благодаря поддержке которых был обеспечен высокий организационный уровень проведения форума, необходимо также отметить главных («платиновых») спонсоров – «Advanced Technology Group» (АТG, Чехия) и «OLYMPUS Industrial Systems», «золотых» спонсоров – «SONATEST» (Англия), «STARMANS electronics» (Чехия) и SENTINEL (США), еще одного «серебряного» спонсора – SECTOR Cert (Германия), а также 14 «бронзовых» спонсоров и среди них партнеров УО НКТД по Европейскому проекту «LRUCM» – английскую компанию «Plant Integrity Ltd.».

Еще на 22 стендах располагались экспозиции национальных обществ по НК, Европейской федерации, Международного комитета и Международной академии по НК, а также будущих подобных форумов – 19-й Всемирной конференции по НК в Мюнхене и 12-й Европейской конференции по НК в Гетеборге.

Наибольшее представительство среди экспонентов выставки (как и в других рассматриваемых категориях) было у Германии – 29 немецких компаний представляли свои новейшие разработки. Большое количество компаний-производителей средств для НК представляли Великобританию, Францию, США и Чехию.

Одно из любимых изречений экономистов — «спрос определяет предложение», т.е. чем большей популярностью пользуется товар, тем больше предложений на него. Поэтому, проанализировав какую аппаратуру, оборудование и материалы представляли фирмы, участвующие в выставке, можно составить приблизительное представление о востребованности методов контроля у потребителей. Как видно из диаграммы, наибольшее и примерно равное предложение на рынке средств НК имеют ультразвуковой и радиографический методы контроля (суммарно 54 %), в то время как на все другие методы контроля приходится меньше половины.



Как отмечалось выше, в рамках конференции проходили заседания подкомитетов Международной организации по стандартизации ISO/TC135 по различным методам контроля, в которых Украина является Р-членом, т.е. голосует по вопросам, касающимся разработки международных стандартов по НК. В заседаниях подкомитетов принимали участие представители УО НКТД: Ю.Н. Посыпайко (SC 2 – поверхностные методы контроля), А. Л. Шекеро (SC 3 – ультразвуковой контроль), В. Н. Учанин (SC 4 –вихретоковый контроль), С. А. Щупак (SC 7 – квалификация персонала).

Второй день работы конференции состоялась Генеральная ассамблея Европейской федерации по НК, в работе которой приняли участие представители национальных обществ Австрии, Бельгии, Болгарии, Хорватии, Чехии, Словакии, Украины, Финляндии, Франции, Германии, Греции, Венгрии, Италии, Казахстана, Португалии, Румынии, России, Сербии, Испании, Швейцарии, Турции, Великобритании, Израиля и др. стран. От нашей страны в Ассамблее участвовали члены Правления УО НКТД М. Л. Казакевич и А. Л. Шекеро.

Программа Ассамблеи включала: представление участников; утверждение отчета о Генеральной ассамблее EFNDT, состоявшейся ранее в 2014 г. году в Брюсселе; отчеты Президента,



# ХРОНИКА -

Совета директоров, комитетов и рабочих групп EFNDT; финансовые вопросы; презентации национальных обществ по НК; предстоящие события.

На Ассамблее с презентацией о деятельности Украинского общества по НК в области организации научно-исследовательских работ по новым перспективным направлениям НК выступил зам. председателя УО НКТД, член Совета директоров EFNDT М.Л. Казакевич.

Те же представители УО НКТД участвовали также в Генеральной ассамблее и 37-м заседании Международного комитета по НК, которые состоялось в предпоследний день работы конференции. На протяжении шести часов представители около 60 национальных обществ по НК (в ICNDT входят 62 полных и 9 ассоциированных членов), а также региональных групп – европейской (EFNDT), Азиатско-Тихоокеанской, Пан-Американской и Африканской, а также ассоциированного органа (ISO) под председательством президента ICNDT М. Farley после представления участников обсуждали такие вопросы:

- утверждение отчетов о 35-м и 36-м заседаниях ICNDT в Дурбане в 2012 году;
- ежегодный отчет и бюджет за 2013 год, промежуточный финансовый отчет за 2014 год;
- стратегический план ICNDT;
- утверждение новых рабочих процедур;
- размеры членских взносов на 2015 год;
- презентация и прием новых членов;
- отчеты комитетов по членству, коммуникациям и публикациям, исплнительного комитета и рабочей группы по сертификации, рабочей группы по исследованиям и образованию;
- презентация 19-й Всемирной конференции по НК в Мюнхене в 2016 году;
- отчеты региональных групп и ассоциированного органа – ISO;
- планы на будущее обновление стратегического плана, кооперация с национальными обществами по мониторингу состояния, обзор структуры ICNDT и региональных групп и модель оплаты членских взносов.

8 октября в Большом зале Конгресс-центра прошел «День европейской науки», главной «движущей силой» в организации которого была Международная академия НК во главе с ее президентом проф. G. Nardoni.

«Изюминкой» этого мероприятия стали доклады на нем профессора Peter W. Higgs, удостоенного Нобелевской премии 2013 года в области физики за теоретическое открытие новой фундаментальной частицы названной Higgs boson, которое объясняет, почему некоторые элементарные частицы имеют массу, и профессора Leon O. Chua, сформулировавшего теории, лежащие в основе мемристоров – новой электрической составляющей, которая в ближайшем будущем заменит цифровую память, основанную на транзисторах.

Помимо уже упомянутых в этом материале официальных участников конференции от Украины конференцию и выставку посетили и другие украинские специалистоы. Так, УО НКТД по традиции, которая берет свое начало от 7-й Европейской конференции в Копенгагене в 1998 г., направило на конференцию делегацию украинских специалистов в составе 28 человек с последующим посещением еще нескольких европейских городов. Организаторами поездки были Ю. Н. Посыпайко и С. А. Щупак (ИЭС им. Е. О.Патона НАН Украины). Подробный отчет о поездке этой группы в настоящее время готовится.

Члены украинской делегации отмечают высочайший уровень проведения конференции и благодарят президента Чешского общества по НК Pavel Mazal и всех членов Оргкомитета за их труд по организации этого знакового события в мире НК и старания сделать пребывание участников конференции максимально полезным с профессиональной точки зрения и комфортным – с бытовой.

Следующая 12-я Европейская конференция по НК состоится в Гетеборге с 11 по 15 июня 2018 года. Но уже через два года (в 2016 г.) специалисты по НК разных стран получат возможность встретиться на 18-й Всемирной конференции по НК в Мюнхене, которая пройдет 13–17 июня.

И в заключение нельзя не сказать хотя бы несколько слов о Праге – одном из самых красивых городов Европы, который называют городом ста шпилей за его своеобразную архитектуру. Прогулки по узким улочкам старой Праги дарят множество ярких эмоций, а панорамные виды с многочисленных холмов и смотровых башен – море незабываемых впечатлений. Огромное количество разноязычных туристов со всего мира, еле-еле протискивающихся в маленькие извилистые улочки Старого города, создают особенную атмосферу непрекращающегося праздника.

Находясь в Праге было приятно чувствовать поддержку Украине и солидарность с ее гражданами в это нелегкое для нашей страны время. Как раз в выходные, дни предшествовавшие конференции, на Староместской площади – главной исторической достопримечательности Старого города – прошла акция «Пражский майдан», на которой чешские и украинские активисты призвали чешское правительство активнее поддерживать Украину в ее борьбе с внешним агрессором за свой европейский выбор.

> А. Л. Шекеро, ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ В. Н. Учанин, ФМИ им. Г. В. Карпенко НАНУ

# ФЛЭШ-РАДИОГРАФИЯ – БУДУЩЕЕ РАДИАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ

Радиографический контроль – самый распространенный метод контроля качества. Его применение сдерживают высокая стоимость расходных материалов (пленок, химикатов, полупроводниковых пластин, считывающих устройств), длительность и сложность получения информации и интерпретация результатов. В ИЭС им. Е.О.Патона НАНУ показано, что радиография может быть мгновенная (получение результатов в реальном времени), при этом стоимость ее результатов в 10 раз ниже, чем при традиционной радиографии.

Применение современных рентгенооптических преобразователей с использованием высокочувствительных ПЗС камер позволило создать недорогие, компактные рентгентелевизионные камеры, по чувствительности и разрешающей способности равные рентгеновской пленке. Цифровая обработка, хранение и отображение полученных рентгентелевизионных изображений выполняются при этом с помощью компьютера (ноутбука). Здесь нет пленок, специальных считывающих устройств, результат мгновенный.

Отдел №4 ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ предлагает специализированное программное обеспечение для обработки оптических и рентгентелевизионных изображений, полученных с помощью портативной рентгентелевизионной системы РТВ-03, которое может быть установлено в ноутбуке. При этом для хранения рентгеновских изображений удобно использовать накопительные устройства, например, такие как флэш-накопители, размер которых составляют десятую часть спичечной коробки. Такой накопитель вмещает информацию о нескольких тысячах рентгеновских изображений.



Рис. 1. Плоскопанельный преобразователь



Флэш-радиография четырехниточного трубопровода на кислородном заводе

### ФЛЭШ-РАДИОГРАФИЯ

## обеспечивает

- мгновенный результат
- чувствительность 1,0...1,5 %
- портативность
- высокую производительность
- экономию времени
- низкую стоимость
- цифровую обработку рентгеновских изображений

#### исключает необходимость

- рентгеновских пленок
- кассет и др. промежуточных носителей
- металлических экранов
- полупроводниковых и фосматических пластин
- специальных помещений
- негатокопов и средств измерения
- промежуточных средств считывания видео-информации



Рис.2. Принципиальная схема ренгенооптического преобразователя



Мгновенное получение и обработка результатов контроля на мониторе ноутбука

Информация о результатах флэш-радиографии с места контроля может быть по интернету мгновенно отправлена на большие расстояния, чего нельзя сделать при пленочной радиографии.

Флэш-радиографмя развивается во всем мире. ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ поставляет Заказчикам плоскопанельные (рис. 1) и рентгенооптические (рис. 2) преобразователи для флэш-радиографии. Данные преобразователи сочетаются практически с любым рентгеновским оборудованием, имеющимся у Заказчика. Для поставки преобразователя необходимо указать размеры желаемого экрана, размеры недопустимых дефектов, состав имеющегося у Заказчика рентгеновского оборудования. ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ берет на себя обязательства по разработке технологии рентгеновского контроля и внедрению на производстве.

Пленочная, полупроводниковая, фосматическая и т.п. «компьютерная» радиография должны уступить место мгновенной недорогой флэш-радиографии.

> Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины E-mail:office@paton.kiev.ua

# ПОДПИСКА — 2015

# на журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»

Укра	ина	Poc	сия	Страны дальнего зарубежья		
на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год	
160 грн.	320 грн.	1200 руб.	2400 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 2014 г. в открытом доступе архивы статей журнала за 2003–2012 гг.

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

Реклама публикуется на обложках и внутренних вклейках следующих размеров

• Первая страница обложки (190х190 мм)

• Вторая, третья и четвертая страницы обложки (200х290 мм)

• Первая, вторая, третья, четвертая страницы внутренней обложки (200х290 мм)

- Вклейка А4 (200х290 мм)
- Разворот АЗ (400х290 мм)
- 0,5 А4 (185х130 мм)
- 0,25 А4 (90х130 мм)

• Размер журнала после обрези 200х290 мм

#### Контакты:

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

• 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 СМҮК, 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 котроль)

• Ответственность за содержание рекламных материалов несет рекламодатель

Подписано к печати 5.11.2014. 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.