

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор
Б. Е. ПАТОН

О. И. Бойчук, Э. Ф. Гарф,
Е. А. Давыдов, А. Т. Зельниченко,
Л. М. Лобанов, З. А. Майдан (отв. секр.),
А. Я. Недосека (зам. гл. ред.), Ю. Н. Посыпайко,
В. А. Троицкий (зам. гл. ред.), Е. В. Шаповалов
ИЭС им. Е. О. Патона, Киев, Украина

В. А. Стрыжало

Ин-т проблем прочности, Киев, Украина

Н. П. Алешин

МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, РФ

В. Л. Венгринович

Ин-т техн. физики, Минск, Республика Беларусь

М. Л. Казакевич

Ин-т физической химии, Киев, Украина

О. М. Карпаш

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

В. В. Ключев

ЗАО НИИИИ МНПО «Спектр», Москва, РФ

З. Т. Назарчук, В. Н. Учанин

Физ.-мех. ин-т, Львов, Украина

Н. В. Новиков

Ин-т сверхтвёрдых 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.Казимира Малевича, 11

ИЭС им. Е.О.Патона НАН Украины

Тел./Факс: (044) 200-82-77, 205-23-90

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com

Научные редакторы

Е. А. Давыдов, Л. Ф. Харченко

Редакторы

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

Свидетельство

о государственной регистрации
КВ4787 от 09.01.2001.

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

СОДЕРЖАНИЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

- НЕДОСЕКА А. Я., НЕДОСЕКА С. А., ОВСИЕНКО М. А., ЯРЕМЕНКО М. А., ГЕРЕБ Я., КУШНИРЕНКО С. А.**
Испытания сосудов давления международной группой специалистов..... 3
- МИСЛОВИЧ М. В., ОСТАПЧУК Л. Б., СИСАК Р. М., ГОРОДЖА А. Д., НОВОТАРСЬКИЙ Ю. О., ТРОЦИНСЬКИЙ Б. О.**
Створення універсальної системи підвищення надійності та подовження ресурсу при будівництві та реконструкції мостових та будівельних конструкцій з використанням акустичного каротажу та віброударної діагностики..... 11
- АВТУШКО А. А., ВАСИЛЕНКО Р. Л., БОРОДИН О. В., ВОЕВОДИН В. Н., КАЛЬЧЕНКО А. С., КУПРИЯНОВА Ю. Э., ЛЫМАРЬ Р. И., НАЗАРЕНКО Е. А., ШЕВЦОВ А. Б.** Повышение ресурса и надежности конструкционных материалов активных зон украинских АЭС за счет оптимизации структурного состояния и микролегирования..... 17
- ОЖИГОВ Л. С., МИТРОФАНОВ А. С., ТОЛСТОЛУЦКАЯ Г. Д., КРАЙНЮК Е. А., ШРАМЧЕНКО С. В.** Комплексный диагностический контроль внутренних дефектов в сварном соединении узла приварки коллектора к корпусу парогенератора энергоблока ВВЭР-1000..... 25
- НИКИФОРЧИН Г. М., ЦИРУЛЬНИК О. Т., ЗВІРКО О. І., ВОЛОШИН В. А.** Діагностування схильності трубної сталі до деградації властивостей внаслідок тривалої експлуатації..... 33
- ТЕТЕРКО А. Я., ГУТНИК В. И.** Специфика формирования электромагнитного поля трещины усталостного происхождения при вихретоковом контроле..... 38
- ІВАНИЦЬКИЙ Я. Л., МАКСИМЕНКО О. П., МОЛЬКОВ Ю. В., КУНЬ П. С., ЧЕПІЛЬ О. Я.** Методика визначення залишкового ресурсу залізобетонних мостових балок та розроблення технічних засобів моніторингу деформацій..... 44

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

- ТОРОП В. М.** Розрахункове обґрунтування впливу промислових вибухів на технічний стан магістральних трубопроводів..... 50

СЕРТИФИКАЦИЯ

- ХОРЛО Н. Ф.** Алгоритмы специальной подготовки кандидата в процессе сертификации специалистов по НК..... 54

ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ

- Х Всеукраїнський фестиваль науки..... 57
- Предложения по организации системы неразрушающего контроля и мониторинга на ПАО «Укрзалізниця»..... 60
- Особенности обследования конструкций высотных сооружений при их реконструкции..... 62

ИЗДАНИЕ ПОДДЕРЖИВАЮТ:

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

Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики

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

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief
B. E. PATON

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

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

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

PWI of the NASU, Kiev, Ukraine

V. A. Stryzhalo

Institute for Problems of Strength, Kiev, Ukraine

N. P. Aleshin

N.E.Bauman MSTU, Moscow, RF

V. L. Vengrinovich

Institute of Applied Physics, Minsk, Belarus

L. M. Kazakevich

Institute of Physical-Chemistry, Kiev, Ukraine

O. M. Karpash

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

V. V. Kluev

CJOSC NIIIB MNPO «Spektr», Moscow, RF

Z. T. Nazarchuk, V. N. Uchanin

Physico-Mechanical Institute, Lvov, Ukraine

N. V. Novikov

Institute for Superhard Materials, Kiev, Ukraine

G. I. Prokopenko

Institute of Metal Physics, Kiev, Ukraine

V. A. Storozhenko

Kharkov National University of Radioelectronics,
 Ukraine

S. F. Fomichev

KPI National Technical University of Ukraine, Kiev

M. G. Chausov

National University of Bioresources and Nature
 Management of Ukraine, Kiev

V. E. Sherbinin

IMF UrD RAS, Ekaterinburg, RF

Address

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

CONTENT

SCIENTIFIC-TECHNICAL

*NEDOSEKA A. Ya., NEDOSEKA S. A., OVSIENKO M. A.,
 YEREMENKO M. A., GEREB Ya., KUSHNIRENKO S. A.*

Testing of pressure vessels by an international expert team 3

*MISLOVICH M. V., OSTAPCHUK L. B., SISAK R. M.,
 GORODJA A. D., NOVOTARSKII Yu. O., TROSHCHINSKII B. O.*

Development of a versatile system for improvement of reliability
 and extension of residual life in construction and reconstruction of
 bridge and building structures, using acoustic logging and vibration
 diagnostics 11

*AVTUSHKO A. A., VASILENKO R. L., BORIDIN O. V., VOEVODIN V. N.,
 KALCHENKO A. S., KUPRIYANOVA Yu. E., LYMAR R. I.,
 HASARENKO E. A., SHEVTSOV A. B.*

Improvement of residual life
 and reliability of structural materials of reactor cores in Ukrainian
 NPP through optimization of structural state and microalloying 17

*OZHIGOV L. S., MITROFANOV A. S., TOLSTOLUTSKAYA G. D.,
 KRAINYUK E. A., SHRAMCHENKO S. V.*

Comprehensive diag-
 nostic monitoring of inner defects in welded joint of the assembly
 connecting collector to steam generator housing in WWER-1000
 power unit 25

*NIKIFORCHIN G. M., TSIRYULNIK O. T., ZVIRKO O. I.,
 VOLOSHIN V. A.*

Diagnostics of pipe steel susceptibility to property
 degradation as a result of long-term operation 33

TETERKO A. Ya., GUTNIK V. I. *Specifics of formation of electromag-*
netic field by a crack of fatigue origin at eddy current testing 38

*IVANITSKII Ya. L., MAXIMENKO O. P., MOLKOV Yu. V.,
 KUN P. S., CHEPIL O. Ya.*

Procedure for determination of residual
 life of concrete bridge beams and development of technical means
 of deformation monitoring 44

INDUSTRIAL

TOROP V. M. Calculated justification of the effect of industrial explo-
 sions on technical condition of the main pipelines 50

STANDARDIZATION AND CERTIFICATION

KHORLO N. F. Algorithms of special training of candidates during
 certification of NDT experts 54

NEWS AND INFORMATION

The X All-Ukrainian Festival of Science 57

Proposals on organizing the system of non-destructive testing and
 monitoring in PJSC «Ukrsaliznysta» 60

Special features of examination of high-rise constructions at their
 reconstruction 62

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

ИСПЫТАНИЯ СОСУДОВ ДАВЛЕНИЯ МЕЖДУНАРОДНОЙ ГРУППОЙ СПЕЦИАЛИСТОВ

А. Я. НЕДОСЕКА¹, С. А. НЕДОСЕКА¹, М. А. ОВСИЕНКО¹, М. А. ЯРЕМЕНКО¹,
Я. ГЕРЕБ², С. А. КУШНИРЕНКО³

¹ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua;

²Венгрия; ³Одесский припортовый завод. 03680, г. Южный, ул. Заводская, 3. E-mail: nktd@opz.odessa

Международная группа специалистов в области неразрушающего контроля и технической диагностики провела испытание двух сосудов, работающих под давлением. Цель испытаний – оценка различных способов определения состояния материала сосудов и прогнозирование разрушающей нагрузки на начальных стадиях нагружения сосуда. Представлены результаты прогнозирования разрушающей нагрузки для сосудов с применением методики, разработанной специалистами Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины. Показано, что прогноз разрушающей нагрузки по указанной методике был выполнен с погрешностью, не превышающей 5 %. Библиогр. 19, табл. 2, рис. 21.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, техническая диагностика, прогнозирование разрушающей нагрузки, состояние материала сосудов

12 мая 2016 г. на территории компании PÉBÉ-COOP GAZIPARI FEJLESZTO, FORGALMAZO ES GYARTO KORLATOLT FELELOSSEGU TARSASAG (далее PÉBÉ-COOP Ltd), г. Хайдусобосло, Венгрия, проведены гидроиспытания двух сосудов для хранения бутана-пропана группой специалистов в составе: Hajdú István (PÉBÉ-COOP Ltd, Венгрия), Dobránszky János (Университет технологии и экономики, г. Будапешт, Венгрия), Fodor Olivér (ÁEF лаборатория, Венгрия), Tóth László, Szűcs Pál, Trampus Péter (все MAROVISZ – Венгерская ассоциация неразрушающего контроля), Günther Habermann (ТРА KKS, Австрия), Pór Gábor (Университет г. Дунауйварош, Венгрия), Geréb János (Венгрия), Недосека Анатолий, Недосека Станислав, Яременко Михаил, Овсиенко Марина (все сотрудники Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины*), Кушниренко Сергей (Одесский припортовый завод). Сотрудники ИЭС участвовали в данной работе международной группы специалистов с целью определения на раннем этапе нагружения сосудов значения разрушающего давления по данным метода АЭ с использованием специализированного программного обеспечения (ПО) ЕМА и соответствующей технологии прогноза.

Объекты испытаний – два сосуда объемом 5 м³, изготовленные в 1995–1996 гг. и введенные в эксплуатацию в 1996 г. Сосуды находились в эксплуатации до конца 2015 г. Они имеют практически одинаковую конструкцию, однотипны по функциям, материалам, геометрическим размерам и тех-

нологии изготовления. Сосуд зав. № 24452 (далее – сосуд 24452) сварен из двух листов (рис. 1); сосуд зав. № 24344 (далее – сосуд 24344) сварен из трех листов (рис. 2). Сосуды имеют по два полусферических днища. Толщина стенки сосудов 6 мм. Материал – немецкая сталь St 52-3. Ближайший отечественный аналог – сталь 17Г1С, предел прочности 510 МПа, предел текучести 350 МПа. Рабочее давление 12,5 и 12,7 бар (1 бар = 1,019716 кгс/см²) соответственно. Расчетное давление – 15,6 бар; заводское гидроиспытание – 19,5 бар.

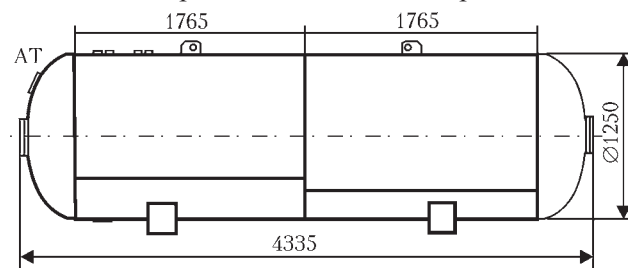
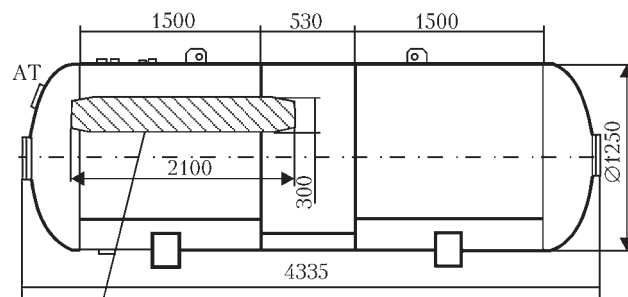


Рис. 1. Сосуд 24452 (толщина стенки 6 мм, материал St 52-3)



Утолщение стенки $s/2$

Рис. 2. Сосуд 24344 с утонением толщины стенки в ограниченной области (толщина стенки 6 мм, материал St 52-3)

* Специалисты ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины и Одесского припортового завода принимали участие в режиме видеоконференции

За время эксплуатации по данным инспекционных записей отмечены только коррозионные повреждения на внешней поверхности сосудов.

Объекты АЭ контроля установлены на горизонтальной площадке, под навесом. Расстояние между сосудами и местом установки оборудования в закрытом помещении 25 м.

На сосуде 24344 перед испытанием предварительно выполнено утонение стенки (см. рис. 2) в ограниченной области с целью создания концентратора напряжений следующим образом: по всей зоне утонения по решетке 50×50 мм просверлены углубления глубиной 3 мм, данная зона отшлифована таким образом, чтобы следы сверления были практически незаметны.

Сосуд 24452 предварительно перемещали с помощью крана с целью имитации потенциальной грубой транспортировки, а также условий подъема и возможного падения сосуда с опор (≈ 350 мм).

Сосуды окрашены белой краской и размечены сеткой 250×250 мм (рис. 3, 4) для удобства установки датчиков.

Нагружение сосудов предполагалось проводить до возникновения одной из ситуаций: разрыва сосудов, достижения максимального значения давления 60 бар, возникновения явных видимых деформаций. Скорость повышения давления (нагружения) ≈ 1 бар/мин. Контроль подъема давления проводили визуально по манометру. Производительность насоса 18 л/мин, максимальное давление 100 бар. Планируемые графики нагружения сосудов представлены на рис. 5.

Перед проведением гидроиспытания в апреле 2016 г. был проведен одноразовый общий контрольный осмотр сосудов с целью установления их реального состояния, который показал, что внутренние поверхности сосудов находятся в целом в хорошем состоянии, на внешних поверхностях в некоторых местах обнаружена коррозия с максимальной глубиной 0,5 мм. Некоторые фото состояния поверхностей сосудов представлены на рис. 6, 7.

В результате проведенного исследования акустических характеристик материала сосудов определены локальные скорости волн АЭ в материале, на основании которых выбрана расчетная скорость при определении координат источников АЭ, равная 5 мм/мкс, получены характеристики затухания волн АЭ, в том числе и при нагружении, определено количество и места установки датчиков АЭ, проведена градуировка измеряемых низкочастотных параметров (давление, деформации).

Определение характеристик волн АЭ в материале сосудов проводили по специальным методикам, аналогичным требованиям нормативных документов к проведению АЭ контроля сосудов при их нагружении внутренним давлением, применяемых в Украине [1–7].

В качестве средства диагностического АЭ контроля специалистами ИЭС использована 16-канальная система ЕМА-4 на основе прибора АЕD-416 (разработчик Венгрия). Расстановку датчиков АЭ на объекте, первоначальную настройку оборудования и непосредственно проведение измерений выполняла компания-разработчик [8].

Для получения информации с объекта в процессе испытаний использовано собственное ПО разработчика – программа АЕD-64. Для расширенной обработки получаемых данных и прогноза на их основе разрушающей нагрузки – ПО ЕМА-3.91 разработки ИЭС (основные данные о приборах АЭ контроля, методиках обработки АЭ данных и программном обеспечении ИЭС представлены в работах [9–19]). Методика прогноза, реализованная в ПО ЕМА-3.91, построена на распознавании образа с применением так называемых учителя и самообучения. Распознавание происходит в реальном времени. Распознавание начинается с момента получения в процессе испытаний минимального достаточного количества обобщенных характеристик сигналов АЭ, прошедших отбраковку и кластеризацию. Происходит их сравнение с заранее сформированными эталонами развития разрушения и сопутствующей этому АЭ. Получив с заданной степенью вероятности наилучшее совпадение с некоторым эталоном по выбранным признакам, предполагают, что отношение разрушающей нагрузки к текущей соответствует таковому эталона. Таким образом получают прогноз разрушения [10–12].

Помимо прогноза важно было отследить при помощи метода АЭ процесс развития трещины. Для этого при послезэкспериментальной обработке данных применена специальная методика, позволившая локализовать область разрушения и графически представить порядок возникновения в ней событий АЭ (см. рис. 16). Последнее имеет существенное значение, так как позволяет задолго до разрушения предвидеть место возникновения трещины, ее границы и кинетику развития.

Для проведения АЭ контроля при гидроиспытаниях сосудов установлено по 10 датчиков АЭ. Поверхность сосудов в местах установки датчиков АЭ подготовлена в соответствии с требованиями, совпадающими с требованиями украинских нормативных документов по проведению АЭ контроля [2, 5].

Датчики №№ 4, 5, 8, 9 установлены на видимой на фото (рис. 3, 4) стороне сосудов (у сосуда 24344 там находится область утонения). Датчики №№ 3, 6, 7, 10 установлены на противоположной (невидимой на фото) стороне сосудов. Датчики №№ 1, 2 установлены на днищах сосуда в местах доступа. Их координаты определены приблизительно, получаемая ими информация носит вспомогательный характер и



Рис. 3. Сосуд 24344. Подготовка к проведению гидроиспытания – установка датчиков АЭ



Рис. 4. Сосуд 24452. Подготовка к проведению гидроиспытания – установка датчиков АЭ

не использовалась при получении координат источников АЭ и прогнозе разрушения.

Место установки датчика № 9 выбрано в качестве начала координат, его координаты (0,0). Координаты всех других датчиков определены в соответствии с разметкой сосудов (250×250 мм). Данные представлены в табл. 1.

Реальный график изменения давления в процессе нагружения сосуда 24344 представлен на рис. 8.

Развертка обоих сосудов с указанием мест установки датчиков АЭ приведена на рис. 9. Вначале из всех установленных на боковой поверхности сосудов датчиков была сформирована единая локационная антенна, которая использовалась в процессе испытания для получения общей АЭ картины испытаний и прогноза разрушающей нагрузки. После испытаний при проведении компьютерного их повтора для

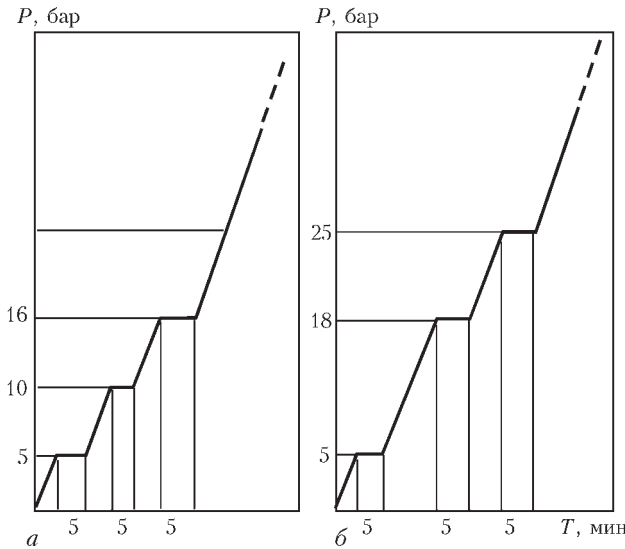


Рис. 5. Планируемые графики нагружения сосудов: а – сосуд 24344 (с утонением); б – сосуд 24452



Рис. 6. Состояние внутренней поверхности сосуда 24344 (с утонением)



Рис. 7. Состояние внешней поверхности сосудов 24344 (а) и 24452 (б)

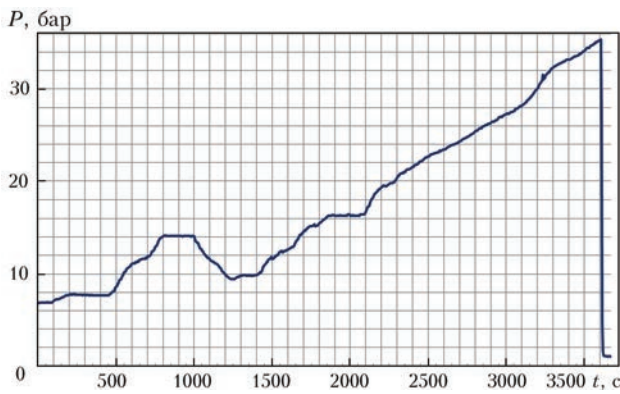


Рис. 8. График нагружения сосуда 24344 при проведении гидроиспытания

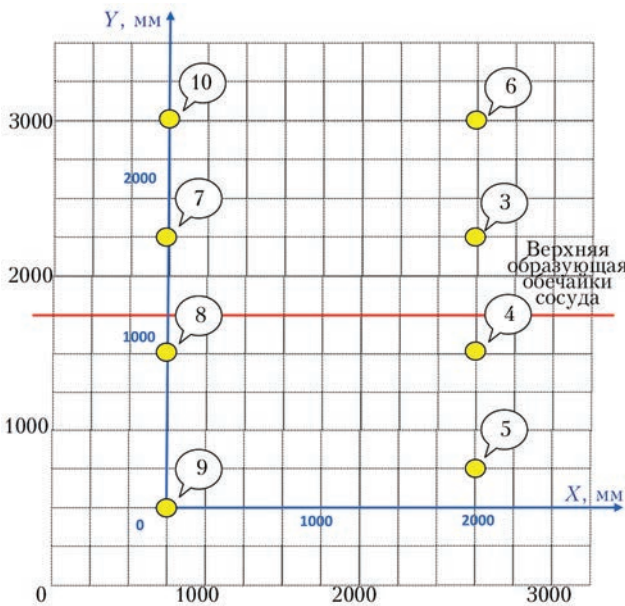


Рис. 9. Развертка боковой поверхности сосуда с указанием мест установки и нумерации датчиков АЭ. Шкала координат для локализации источников АЭ показана синим цветом

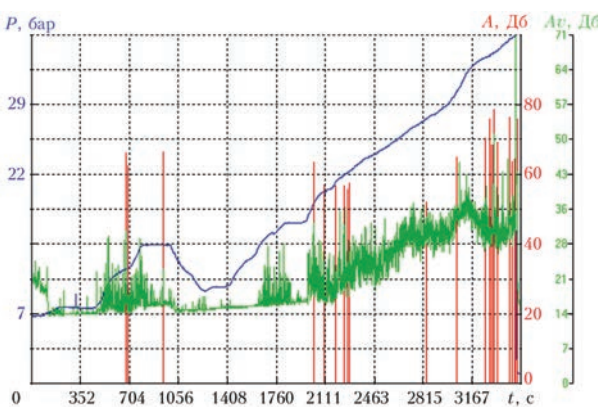


Рис. 10. График нагружения и АЭ информация при проведении гидроиспытания сосуда 24344 (синяя линия показывает текущую нагрузку, столбиками показаны амплитуды дискретных сигналов АЭ, пульсирующей линией – средний уровень непрерывного АЭ сигнала)

Таблица 1. Координаты установленных на объектах датчиков АЭ

Датчики АЭ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
X, мм	3500	1500	2000	2000	2000	2000	0	0	0	0
Y, мм	500	1000	1750	1000	250	2500	1750	1000	0	2500

более детальной локализации источников АЭ антенна была разделена на участки меньшего размера.

На рис. 10 показаны графики основных АЭ параметров, зарегистрированных во время проведенного испытания. Как видим, развитие разрушения сопровождалось постепенным ростом среднего уровня непрерывного сигнала АЭ и увеличением амплитуд дискретных сигналов.

Результаты проведенного АЭ контроля, в том числе с выдачей прогнозных характеристик для сосуда 24344, представлены на рис. 11–14.

В окне «Испытания» программы ЕМА-3.91, представленном на рис. 11 и др., имеются следующие основные экраны:

- экран «Индикатор и прогноз состояния» в верхней части окна под панелью инструментов предназначен для прогноза разрушающей нагрузки. Таблица со значениями прогнозных данных содержит одновременно и цветовой индикатор, предупреждений об опасности. В таблице показаны номер антенны и координаты кластера, для которых выполнен прогноз, а также минимальное и максимальное поля допуска прогнозируемого параметра;

- экран локации, расположенный под индикатором прогноза, – окно, в котором схематически отображаются одна или несколько локационных антенн, т.е. схема установки датчиков на объекте с указанием координат датчиков. На месте возникновения события АЭ при плоскостной локации появляется точка. События АЭ, прошедшие необходимую фильтрацию, объединяются по заданным признакам в кластер. Программа рассчитывает координаты центра кластера, на этом месте появляется флажок;

- экран «Графики реального времени» в правой части окна отображает графически изменения

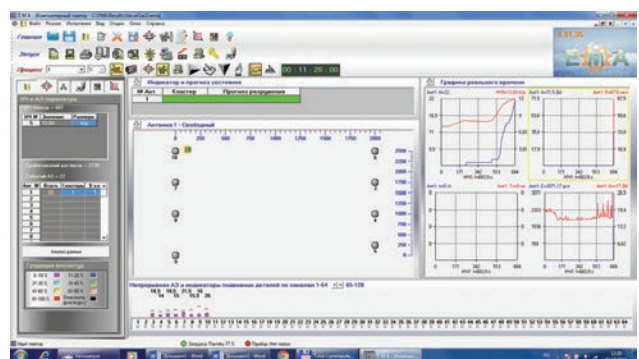


Рис. 11. Окно испытаний программы ЕМА-3.91 при проведении гидроиспытания сосуда 24344. Система показывает появление первых событий АЭ

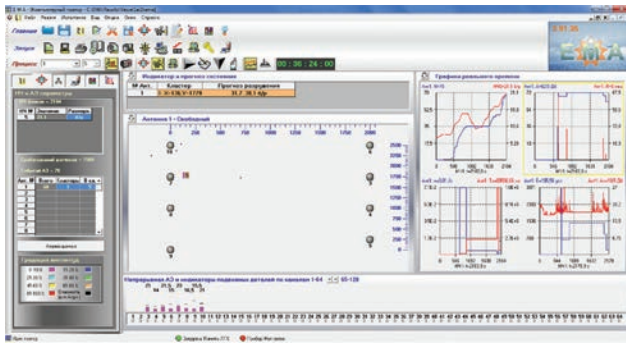


Рис. 12. Окно программы EMA-3.91 при проведении гидроиспытания сосуда 24344. Выдача предупреждения 2 уровня и прогноза разрушающей нагрузки

до 64 выбираемых пользователем АЭ или технологических параметров при испытаниях;

– экран «Непрерывная АЭ и индикаторы подвижных деталей» в нижней части окна отображает цифрами и столбиками изменения во времени непрерывной АЭ по каждому каналу. Горизонтальной чертой показаны пороги ограничения амплитуд.

Первое предупреждение «Обратить внимание» для сосуда 24344 (с утонением) было выдано при давлении 14,56 бар. При нагрузке 19,02 бар и на первом же уровне предупреждения «Обратить внимание» был выдан прогноз разрушения сосуда – 31,71...38,05 бар.

Второй уровень предупреждение «Повысить внимание» выдан при нагрузке 20,16 бар. Значение прогнозной разрушающей нагрузки при этом не изменилось. Третий уровень предупреждения «Опасность» выдан при нагрузке 21,16 бар. Значение прогнозной разрушающей нагрузки при этом также не изменилось. Однако центр обобщенного по всем событиям АЭ кластера, используемого для прогноза разрушения, сместился в точку с координатами $X = 718$ мм, $Y = 958$ мм. Далее будет показано, что эта координата практически совпадает с координатой АЭ события № 3 при переходе к более точной

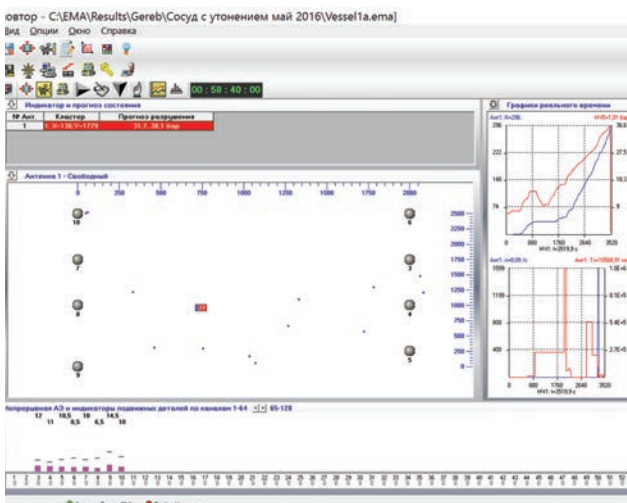


Рис. 13. Экран локации и индикатор прогноза по завершению испытания

локации, используемой для отслеживания порядка появления событий АЭ в процессе формирования трещины.

Разрушающая нагрузка составила 36,54 бар. Погрешность прогноза разрушения не превышает 5 %, а сам прогноз был сделан всего по четырем зарегистрированным системой событиям АЭ.

Для дополнительной проверки выполнено детальное послезэкспериментальное исследование локации координат источников АЭ. Методика предусматривала анализ информации отдельно с каждого



Рис. 14. Снимок части экрана программы EMA-3.91. Список выданных системой предупреждений 1, 2 и 3 уровней и прогноза разрушающей нагрузки для сосуда 24344

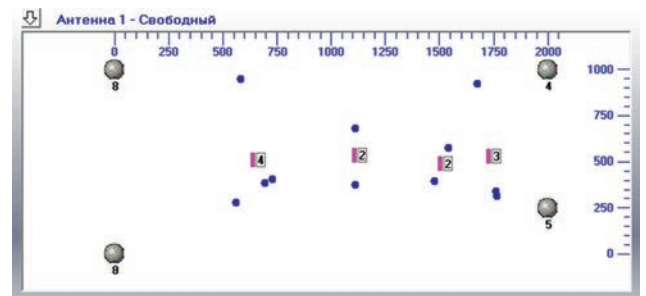


Рис. 15. Экран локации: программа EMA-3.91 в области развития трещины для сосуда 24344. Трещина приблизительно показана красными квадратами

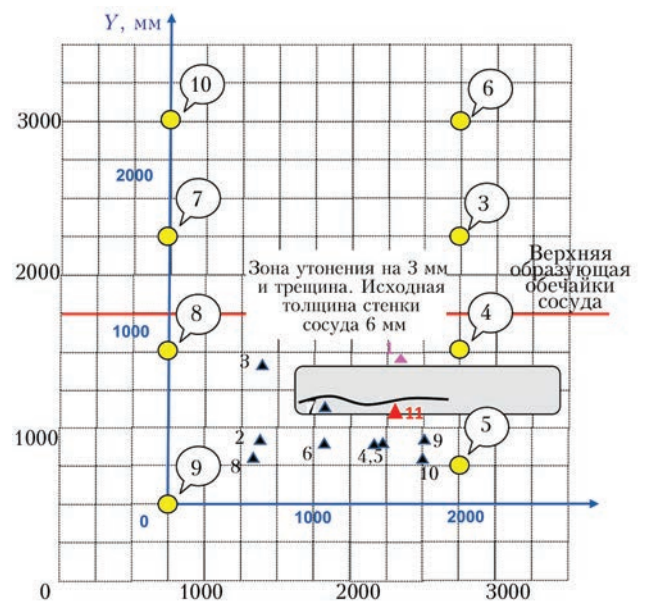


Рис. 16. Порядок появления событий АЭ в области развития трещины для сосуда 24344. События показаны треугольными маркерами и пронумерованы: 1-й импульс показывает зону начала разрушения (розовый), 11-й импульс завершающий (красный). Он соответствует началу образования трещины. Остальные импульсы (черные) показывают движение разрушающей деформации вдоль траектории будущей трещины в различные моменты времени

участка, образованного четырехугольной группой из соседних датчиков. Переход к меньшей области локации позволяет повысить точность определения координат источников АЭ и отсеять те события АЭ, которые не относятся к данному участку. Наибольший интерес представляет анализ информации с участка в области трещины, принятой локационной антенной из четырех датчиков (табл. 2).

Таблица 2. Координаты датчиков АЭ в области развития трещины

Датчики АЭ	4	5	8	9
X, мм	2000	2000	0	0
Y, мм	1000	250	1000	0

Компьютерный повтор проведенного испытания показал удовлетворительное соответствие полученных координат источников АЭ участку развития трещины. Расположение вероятного места разрушения получено методом кластерного анализа по координатному признаку. Места возникновения событий АЭ показаны точками, а образовавшиеся на их основе четыре кластера представлены флажками на рис. 15.

Кластеры на рис. 15 образованы на основании 11 событий АЭ, показанных точками. Порядок их, представленный на рис. 16, фактически отображает стадийность роста трещины.



Рис. 17. Сосуд 24344 (с утонением) после разрушения

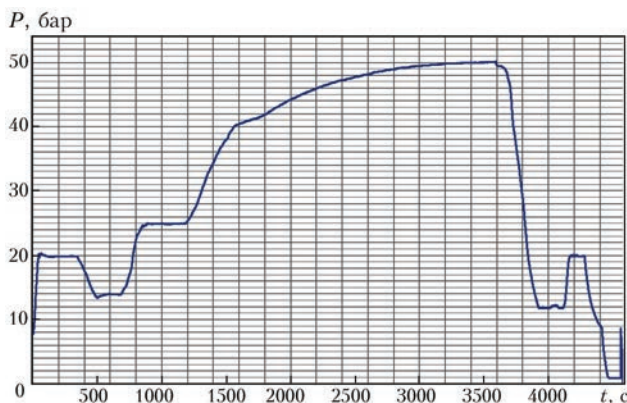


Рис. 18. График изменения нагрузки при проведении гидроиспытания сосуда 24452

Вид сосуда 24344 после разрушения представлен на фото (рис. 17). Как видим, применение метода АЭ обеспечило достаточно эффективную локацию места разрушения, отслеживание отдельных этапов развития разрушения и точный прогноз разрушающей нагрузки.

В отличие от сосуда 24344, по техническим причинам сосуд 24452 не был доведен до разрушения. Испытание было остановлено при величине давления 50 бар.

График изменения давления при проведении гидроиспытания сосуда 24452 показан на рис. 18. Результаты проведенного АЭ контроля представлены на рис. 19–21.

На рис. 19 показаны графики основных АЭ параметров, зарегистрированных во время проведенного испытания. Характер АЭ существен-

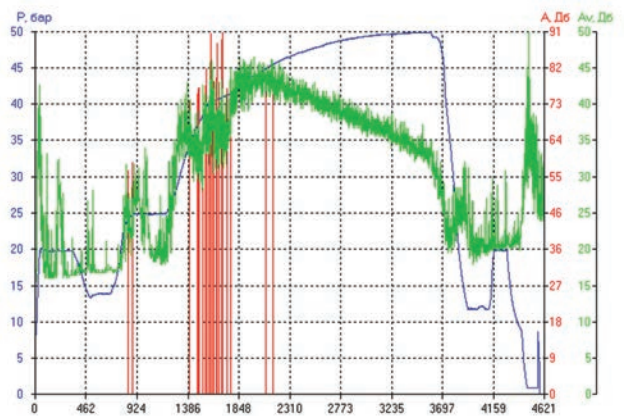


Рис. 19. График нагружения и АЭ информация при проведении гидроиспытания сосуда 24452 (синяя линия показывает текущую нагрузку, столбиками показаны амплитуды дискретных сигналов АЭ, пульсирующей – средний уровень непрерывного АЭ сигнала)

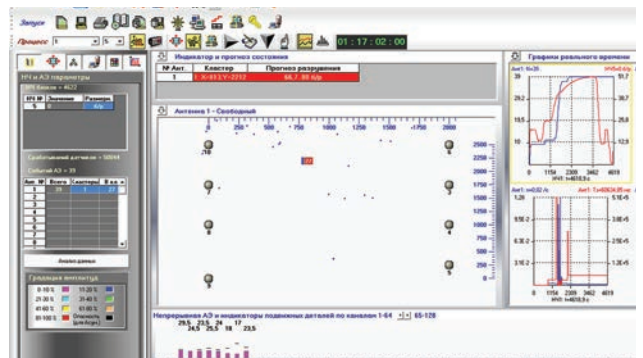


Рис. 20. Окно программы ЕМА-3.91 при проведении гидроиспытания сосуда 24452. Выдача предупреждения 3 уровня и прогноза разрушающей нагрузки

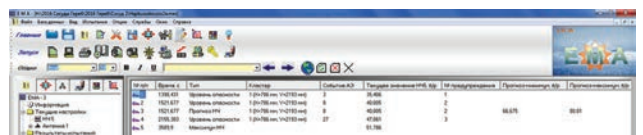


Рис. 21. Снимок части экрана программы ЕМА-3.91. Список выданных системой предупреждений 1, 2 и 3 уровней и прогноза разрушающей нагрузки для сосуда 24452

но отличается от такового для сосуда 24344 (см. рис. 10). В частности, при максимальном достигнутом давлении дискретная АЭ отсутствует.

Первое предупреждение «Обратить внимание» было выдано для сосуда 24452 при нагрузке 35,40 бар. При нагрузке 40,00 бар и втором уровне предупреждения «Повысить внимание» был выдан прогноз разрушения сосуда – 66,675...80,01 бар. Третий уровень предупреждения «Опасность» выдан при нагрузке 47,06 бар. Значение прогнозной разрушающей нагрузки при этом не изменилось. Отметим, что прогноз был сделан на основании восьми событий АЭ.

Поскольку сосуд 24452 не был доведен до разрушения, прогноз разрушающей нагрузки экспериментально не подтвержден.

Оценим, насколько он мог бы быть верным, если бы материал сосуда соответствовал его табличным характеристикам. Рассчитаем разрушающее давление по формуле Лапласа для цилиндрической части:

$$P = \sigma_b \delta / R,$$

где σ_b – предел прочности; δ – толщина стенки; R – радиус цилиндра.

Получим: $P = 510 \cdot 0,006 / 0,625 = 4,9$ МПа = 49 кгс/см² = 48 бар.

Как видим, прогнозируемое разрушающее давление 66,675 бар превосходит расчетное. Тем не менее, прогноз, вероятнее всего, соответствует реальному состоянию материала, поскольку:

- значение предела прочности в 510 МПа в табличных характеристиках материала – стали St 52-3 помечено как минимально возможное;

- в момент остановки нагружения при значении давления 50 бар и, соответственно, напряжениях, превосходящих табличный предел прочности, сосуд 24452 не только не был разрушен, но и не претерпел каких-либо видимых нарушений геометрических размеров.

Отметим также, что на момент выдачи прогноза текущая нагрузка составила приблизительно 55 % (сосуд 24344) и 60 % (сосуд 24452) от прогнозной разрушающей.

Результаты испытаний соответствуют методике, обеспечивающей точность прогноза разрушения, в соответствии с требованиями нормативных документов [3, 4], с погрешностью ± 15 % и с вероятностью 0,95.

Выводы

При испытании сосудов 24344 и 24452 система АЭ диагностики ЕМА-4 с программным обеспечением ЕМА-3.91 выполнила поставленные задачи по прогнозированию разрушающей нагрузки и локализации места разрушения.

Для обоих испытанных сосудов обеспечено своевременное получение предупреждений об опасности 1, 2 и 3 уровней.

Прогноз разрушающей нагрузки для сосуда 24344 (с утонением) получен в диапазоне 31,71...38,05 бар, с погрешностью в соответствии с требованиями нормативных документов ± 15 %, при реальном значении нагрузки 19,02 бар. Разрушающая нагрузка составила 36,54 бар. Реальная погрешность прогноза составляет менее 5 %. Координаты источников АЭ в локальной области, близкой к участку развития трещины, удовлетворительно соответствуют месту расположения трещины после разрушения.

Специальная методика обработки АЭ информации позволила достаточно эффективно локализовать область развития разрушения и показать на основе данных АЭ стадийность развития трещины.

Прогноз разрушающей нагрузки для сосуда 24452 получен в диапазоне 66,675...80,01 бар с предполагаемой погрешностью, в соответствии с требованиями нормативных документов, ± 15 % при реальной нагрузке 40,00 бар. Реальная погрешность выданного прогноза не определена в связи с прекращением испытания по техническим причинам. Прогнозируемое разрушающее давление превышает таковое, полученное путем расчета сосуда на прочность, и это соответствует реальной ситуации, поскольку в момент остановки нагружения напряжения в материале сосуда 24452 превысили табличный предел прочности, при этом сосуд был цел и не имел выраженных признаков нарушения геометрических размеров.

Методика, разработанная сотрудниками ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины по прогнозированию разрушающей нагрузки и локализации места разрушения сосудов 24344 и 24452, может быть рекомендована для аналогичных натуральных АЭ испытаний сварных конструкций, нагружаемых внутренним давлением.

1. Котли, посудини під тиском і трубопроводи. Технічне діагностування. Загальні вимоги: ДСТУ 4223–2003 / І. Волошкевич, Е. Гарф, А. Грузд, В. Долинський, В. Качанов, В. Кир'ян, А. Лебедев, Л. Лобанов, А. Недосека, С. Недосека, М. Овсієнко, Г. Прокопенко, С. Стасюк, В. Стрижало, С. Фомічов, М. Чаусов, М. Яременко. – Держстандарт України, 2003. – 11 с.
2. Настанови щодо проведення акустико-емісійного діагностування об'єктів підвищеної небезпеки: ДСТУ 4227–2003 / А. Недосека, О. Андрейків, І. Волошкевич, А. Грузд, А. Лебедев, Л. Лобанов, С. Недосека, М. Новіков, М. Овсієнко, В. Скальський, С. Стасюк, В. Стрижало, Л. Харченко, М. Чаусов, М. А. Яременко. – Держстандарт України, 2003. – 25 с.
3. МДУ 016/10–2002. Багатоканальні акустико-емісійні діагностичні комплекси. Методика державної метрологічної атестації / С. А. Недосека, М. А. Яременко, Л. Ф. Харченко, М. А. Овсієнко, І. Г. Волошкевич, А. П. Іващенко // ТК-78 «ТДНК». – 2002. – 15 с.
4. Багатоканальні акустико-емісійні діагностичні комплекси. Методика атестації: МДУ 017/10–2002 / С. А. Недосека.

- сека, М. А. Яременко, Л. Ф. Харченко, М. А. Овсієнко, І. Г. Волошкевич, А. П. Іващенко // ТК-78 «ТДНК». – 2002. – 15 с.
5. Рекомендації щодо акустико-емісійного контролю об'єктів підвищеної небезпеки: Р 50.01–01 / А. Недосека, І. Волошкевич, А. Грузд, С. Недосека, М. Овсієнко, В. Троїцький, Л. Харченко, В. Скальський, М. Вісіловський, В. Радько, Ю. Єськов, М. Яременко // ТК-78 «ТДНК». – 2001. – 29 с.
 6. Інструкція експертного обстеження (технічного діагностування) стану металу посудин, що працюють під тиском, при використанні акустико-емісійного методу контролю / А. Недосека, А. Грузд, С. Недосека, М. Овсієнко, Л. Харченко, М. Яременко, Я. Карявка, В. Мартюк // ТК-78 «ТДНК». – 2008. – 36 с.
 7. Настанови щодо проектування та впровадження систем акустико-емісійного контролю, діагностування та моніторингу об'єктів підвищеної небезпеки: СОУ 50.10–2012 / А. Недосека, А. Грузд, С. Недосека, М. Овсієнко, Л. Харченко, М. Яременко // ТК-78 «ТДНК». – 2012. – 8 с.
 8. Пеллионис П. Методика и аппаратура для АЭ-контроля в процессе проверочных испытаний сосудов высокого давления ядерного реактора в Венгрии / П. Пеллионис, Я. Гереб // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1991. – № 3. – С. 14–21.
 9. Приборы для акустико-эмиссионного контроля и диагностирования сварных конструкций / А. Я. Недосека, С. А. Недосека, А. А. Грузд [и др.] // Автоматическая сварка. – 2010. – № 8. – С. 58–61.
 10. Недосека С. А. Диагностические системы семейства «ЕМА». Основные принципы и особенности архитектуры (Обзор) / С. А. Недосека, А. Я. Недосека // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2005. – № 3. – С. 20–26.
 11. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций; под редакцией Б. Е. Патона / А. Я. Недосека. – К.: Индпром, 2008. – 812 с.
 12. Недосека С. А. Прогноз разрушения по данным акустической эмиссии / А. Я. Недосека // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2007. – № 2. – С. 3–9.
 13. Недосека А. Я. Акустическая эмиссия и ресурс конструкций (Обзор) / А. Я. Недосека, С. А. Недосека // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2008. – № 2. – С. 3–11.
 14. Недосека С. А. Комплексная оценка поврежденности и остаточного ресурса металлов с эксплуатационной наработкой / С. А. Недосека, А. Я. Недосека // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2010. – № 1. – С. 9–16.
 15. Недосека А. Я. Об оценке надежности эксплуатирующихся конструкций (состояние вопроса и перспектива развития) / С. А. Недосека, А. Я. Недосека // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2010. – № 2. – С. 7–17.
 16. Недосека С. А. Влияние методов обработки акустико-эмиссионной информации на формирование АЭ событий и определение их координат / С. А. Недосека, А. Я. Недосека, М. А. Овсієнко // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2011. – № 2. – С. 5–14.
 17. Опыт ИЭС им. Е. О. Патона в области акустико-эмиссионного контроля / Б. Е. Патон, Л. М. Лобанов, А. Я. Недосека [и др.] // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2012. – № 1. – С. 7–22.
 18. Программное обеспечение систем АЭ диагностики ЕМА-3.9 / А. Я. Недосека, С. А. Недосека, М. А. Яременко [и др.] // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2013. – № 3. – С. 16–22.
 19. Оптимизация размещения датчиков и повышение точности локализации источников акустической эмиссии / С. А. Недосека, М. А. Овсієнко, Л. Ф. Харченко [и др.] // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2015. – № 3. – С. 18–25.

International team of experts on non-destructive testing and technical diagnostics performed testing of two pressure vessels. The objective of testing was evaluation of various techniques for determination of vessel material state and prediction of breaking load at initial stages of vessel loading. The paper presents the results of prediction of vessel breaking load with application of a procedure developed by staff members of the E.O.Paton Electric Welding Institute of NASU. It is shown that prediction of breaking load by the above procedure was performed with not more than 5% error. 19 References, 21 Figures, 2 Tables

Keywords: nondestructive testing, technical diagnostics, breaking load prediction, vessel material state

*Поступила в редакцию
08.07.2016*

ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОСВАРКИ им. Е.О. ПАТОНА НАН УКРАИНЫ

объявляет ежегодный набор в

АСПИРАНТУРУ по специальностям:

132 «Материаловедение»

136 «Металлургия»

Прием в аспирантуру проводится в сентябре месяце.

Контактный телефон: (044) 200-84-11

Подробная информация на сайте института (раздел аспирантура):

www.paton.kiev.ua

Документы направлять по адресу:

03680, Украина, Киев-150, ГСП, ул. Казимира Малевича (Боженко), 11

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, ученому секретарю

СТВОРЕННЯ УНІВЕРСАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТА ПОДОВЖЕННЯ РЕСУРСУ ПРИ БУДІВНИЦТВІ ТА РЕКОНСТРУКЦІЇ МОСТОВИХ ТА БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ АКУСТИЧНОГО КАРОТАЖУ ТА ВІБРОУДАРНОЇ ДІАГНОСТИКИ

М. В. МИСЛОВИЧ¹, Л. Б. ОСТАПЧУК¹, Р. М. СИСАК¹, А. Д. ГОРОДЖА²,
Ю. О. НОВОТАРСЬКИЙ², Б. О. ТРОЩИНСЬКИЙ²

¹Ін-т електродинаміки НАН України. 03680, Київ-57, просп. Перемоги, 56. E-mail:sysak_r@jahoo.com

²Київ. нац. ун-т будівництва і архітектури. 03680, Київ-36, Повітрофлотський просп., 37. E-mail: bohgant@gmail.com

Розроблена універсальна комп'ютерна система, призначена для дефектоскопії мостових та будівельних конструкцій з використанням методів акустичного каротажу та віброударної діагностики. Основною метою дослідження проекту було підвищення надійності та подовження ресурсу при будівництві та реконструкції мостових та будівельних конструкцій шляхом розроблення та впровадження відповідних технічних засобів. Застосування розробленої системи дозволить визначати ступінь надійності несучих залізобетонних конструкцій, у тому числі при відновленні об'єктів, частково зруйнованих внаслідок стихійних лих, техногенних та інших катастроф. Бібліогр. 3, рис. 7.

Ключові слова: будівельні та мостові конструкції, віброударна діагностика, метод акустичного каротажу

У сучасному будівництві до 75 % будівель і споруд зводяться на пальових фундаментах (буронабивні палі і стовпи, буроін'єкційні по СFA-технології тощо). З початку використання бетонних паль досі існує проблема забезпечення надійності фундаментів, оскільки процес улаштування паль приховано від спостереження і в палях можливе утворення дефектів, які можуть привести споруду до аварійного стану. Технології улаштування паль постійно удосконалюються, однак повністю уникнути утворення дефектів у стовбурах паль досі не вдається.

Науково-дослідною лабораторією діагностики агрегатів, конструкцій і споруд (НДЛ ДАКіС) науково-дослідного комплексу Київського національного університету будівництва та архітектури (КНУБА) були проведені масштабні дослідження з метою систематизації характерних дефектів у палях різного виконання та встановлення причин їх утворення [1]. При цьому фірмою «Фундамент» (м. Київ) сумісно з НДЛ ДАКіС на різних об'єктах м. Києва було витягнуто понад 2 тис. забивних паль (довжиною 6, 8 і 10 м), котрі були занурені 10...15 років тому. Приблизно 80 % з них мали один чи декілька дефектів. В результаті досліджень було встановлено, що основними причинами утворення дефектів у палях є порушення технології виконання робіт, а також вплив ґрунтових умов. Однак, дефекти в стовбурах паль можуть утворюватись також і при повному дотриманні технології їх улаштування. Отримані

результати свідчать про необхідність проведення дефектоскопії виготовлених паль з використанням спеціальних технічних засобів.

В ході досліджень була розроблена система віброударної діагностики будівельних та мостових конструкцій, в основу роботи якої покладені математичні ймовірнісні моделі вібрацій та статистичні методи їхньої обробки [2]. Завдяки цьому було досягнуто підвищення достовірності результатів дефектоскопії занурених у ґрунт залізобетонних паль малої та середньої довжини. Однак технічні обмеження, притаманні віброударному методу, не дозволяють застосовувати цю систему для дефектоскопії довгих паль.

Для забезпечення високої ефективності та достовірності дефектоскопії особливо відповідальних несучих конструкцій було розроблено універсальну комп'ютерну систему, в якій одночасно реалізовані два методи неруйнівного контролю залізобетонних конструкцій: віброударний та метод акустичного каротажу.

Методи дефектоскопії залізобетонних конструкцій. На даний час відомо декілька методів для неруйнівного обстеження та діагностики (дефектоскопії) занурених у ґрунт конструкцій з обмеженим доступом. Серед них найбільшого поширення набули два методи – луно-метод та метод акустичного каротажу. Незважаючи на суттєві відмінності в принципах, що покладені в основу цих двох методів, у ході виконання проекту було знайдено технічні рішення, які дозволили

реалізувати обидва ці методи у єдиній універсальній системі, призначеній для визначення фактичного технічного стану паливних фундаментів, а також створити дослідний зразок такої системи.

Луно-метод був запропонований у 1960-х роках Жаном Паке (Франція) [3]. Основний принцип методу полягає в тому, що з вільного торця палі за допомогою ударного пристрою (спеціального молотка) збуджується пружна поздовжня хвиля стиснення – так званий зондувальний імпульс (рис. 1). При поширенні ця хвиля відбивається від тих ділянок, де змінюється хвильовий опір матеріалу (відбувається зміна геометричних параметрів конструкції або зміна фізико-механічних властивостей матеріалу), у тому числі й від кінця палі. Приймач пружних хвиль (датчик), що встановлений поруч з точкою збудження, сприймає зондувальний імпульс, а також імпульси, відбиті від неоднорідностей та кінця стовбура палі. Миттєві значення його сигналу пропорційні швидкості або прискоренню переміщення торця палі (в залежності від типу встановленого датчика). Вони фіксуються у вигляді функції часу за допомогою пристрою, що перетворює їх у числовий код та передає у комп'ютер для подальшої обробки. Отримана таким чином реалізація хвильового процесу в конструкції містить інформацію про внутрішній стан стовбура палі – міцність матеріалу, наявність дефектів, їх параметри і координати по довжині палі. Частотна область хвильових процесів при цьому виді генерації пружних хвиль становить 0,5...10 кГц. В якості приймача використовується сейсмотатчик (вимірює віброшвидкість) або акселерометр (віброприскорення).

Основна перевага луно-методу полягає в тому, що його застосування не вимагає спеціальної підготовки палі для проведення обстежень, тому цей метод може бути використаний для масового контролю палі. Із недоліків методу слід зазначити його низьку ефективність при перевірці довгих палі (коли довжина палі перевищує 20...30 її діаметрів)

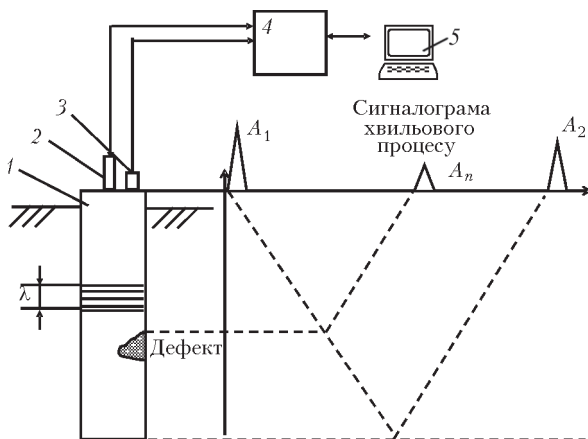


Рис. 1. Спрощена схема луно-методу для дефектоскопії палі: 1 – палія; 2 і 3 – збуджувач та приймач пружних хвиль; 4 – контролер; 5 – комп'ютер; A_1 і A_2 – зондувальний та відбитий сигнали; A_n – відбиття від дефекту; λ – довжина пружної хвилі

внаслідок значного згасання сигналу, а також порівняно низьку роздільну здатність та складність інтерпретування результатів перевірки конструкцій зі складною геометричною формою чи при наявності декількох дефектів. Тому на відповідальних об'єктах виникає необхідність додатково використовувати метод акустичного каротажу.

Метод акустичного каротажу використовується для оцінки стану бетону монолітних палі (кесонів або бурових стовпів) і залізобетонних стін у ґрунті. Один п'єзоелектричний перетворювач використовується для генерації сигналу, який поширюється у вигляді звукової хвилі (хвилі стиснення) всередині бетону, а інший датчик використовується для виявлення сигналу. Кожен перетворювач поміщають у вертикально розташовану трубу з ПВХ або сталі, яка була прикріплена до арматурного каркаса й наповнена водою до початку укладання бетону. Вода діє в якості контактної середовища між датчиком і трубою. Типова схема розташування труб і принципи тестування зображені на рис. 2, а.

Передавач і приймач опускаються на дно відповідних трубок і розміщуються в одній горизон-

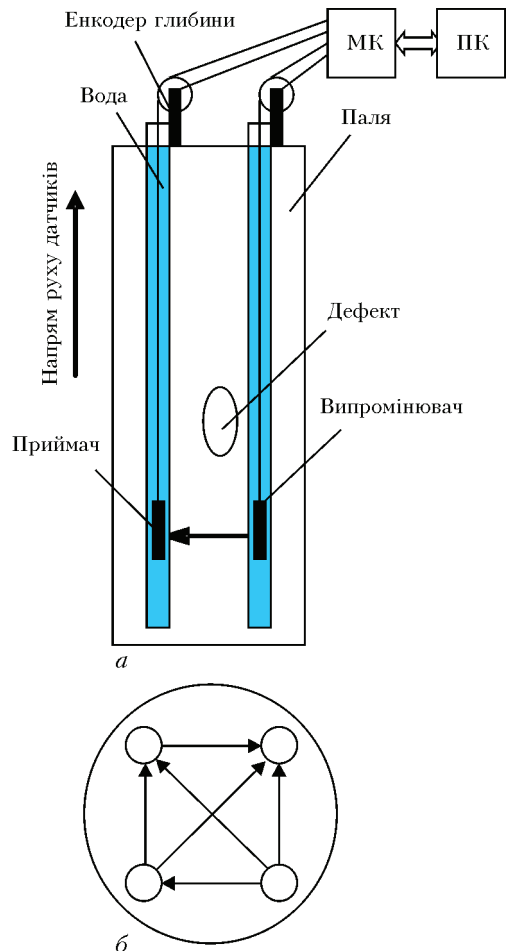


Рис. 2. Спрощена схема акустичного каротажу: а – схема проведення каротажу (МК – мікроконтролер); б – комбінації прозвучування по схемі з чотирма трубами

тальній площині. Під час проведення обстеження перетворювач–випромінювач генерує звукові імпульси (з частотою ≈ 10 імпл/с), які детектуються за допомогою приймача в сусідній трубці. Обидва перетворювачі одночасно витягують зі сталюю швидкістю $\approx 0,5$ м/с до верху стовбура. Цей процес повторюють для всіх можливих комбінацій пар трубок (по периметру і діагоналях). Наприклад, на рис. 2, б показано шість комбінацій пар труб, які можуть використовуватися при конфігурації з чотирма трубками в буровому стовпі. Збільшення діаметра стовбура вимагає використання більшої кількості труб, що збільшує і число комбінацій, покращуючи тим самим роздільну здатність в зоні тестування. За результатами обстеження при кількості труб більше трьох можливо отримати тривимірну модель палі (томографію).

Розглянемо особливості побудови дослідного зразка універсальної системи акустичного каротажу та віброударної діагностики палих фундаментів.

Структура дослідного зразка системи. Незважаючи на те, що для забезпечення вимірювань хвильових процесів при застосуванні розглянутих вище методів висуваються різні вимоги до АЦП (для луно-методу необхідні велика розрядність при відносно невисокій частоті дискретизації, а для акустичного каротажу навпаки – вища частота дискретизації при відносно невеликій розрядності) при виготовленні дослідного зразка універсальної системи в ході виконання проекту було використано один МК для реалізації обох методів.

Узагальнена структурна схема удосконаленого модуля збору інформації універсальної системи

акустичного каротажу та віброударної діагностики зображена на рис. 3.

Робота системи здійснюється під впливом сигналів управління, які надсилаються через універсальний порт комп'ютера USB спеціальним програмним забезпеченням. Вхідні дані заносяться в блок реєстра керування режимами роботи для визначення необхідного режиму роботи апаратури.

Вхідна інформація містить: коефіцієнти підсилення для чотирьох каналів датчиків; вибір частоти перетворення аналогових сигналів у цифрову форму; ознаку способу запуску апаратури під час проведення вимірювання.

Керування всіма елементами апаратури збору інформації здійснюється за допомогою МК типу STM32F103. Мікроконтролери STM32 виконані на основі технології Cortex-M3, яка спеціально розроблена для застосувань, де необхідні розвинені системні ресурси і мале енергоспоживання. При цьому вони мають настільки низьку вартість, що можуть конкурувати з традиційними 8- і 16-бітними МК.

Блок підсилювача виконаний на основі диференційних підсилювачів з програмованим коефіцієнтом підсилення типу AD8231. Підсилений сигнал надходить на вбудований в МК АЦП, а режим його роботи задається в залежності від виду вимірювань. Необхідно зазначити, що використаний мікроконтролер містить два окремих АЦП, кожен з яких може працювати з частотою дискретизації до 1 МГц. Це надає можливість при виконанні каротажу піднімати частоту дискретизації до 2 МГц, а в режимі луно-методу виконувати усереднення даних, тим самим збільшуючи чутливість перетворювача. Дискретні входи і виходи МК використовуються

для під'єднання енкодера глибини та інших цифрових датчиків, а також для керування випромінювачем УЗ коливань.

Отримані в ході обстеження дані накопичуються в статичному запам'ятовуючому пристрої МК і після виконання вимірювань передаються через шину USB у комп'ютер. Використання такого режиму роботи зменшує кількість цифрових завад. Також можливий режим попередньої обробки отриманих даних в МК, що зменшує обсяг обміну даними по шині USB.

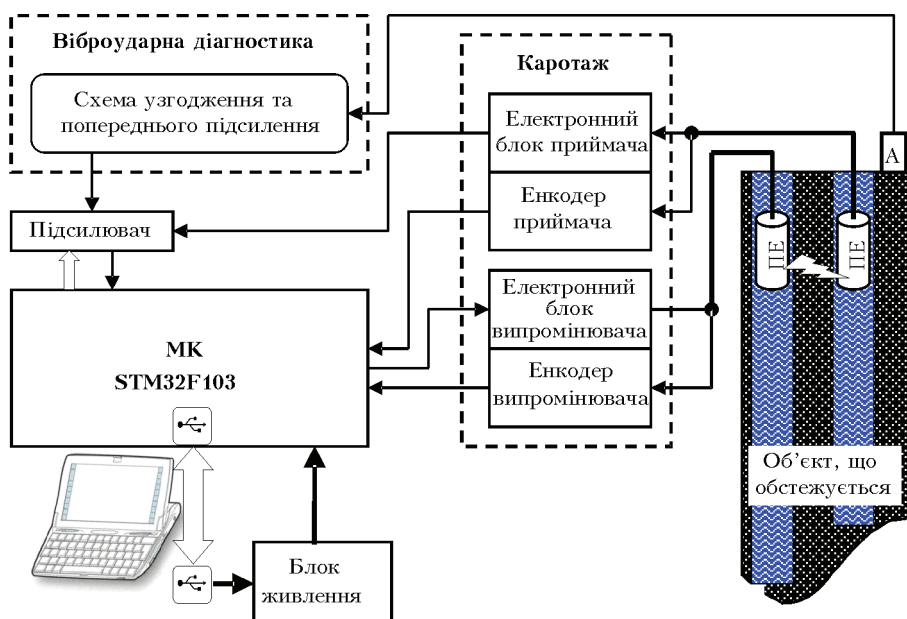


Рис. 3. Структурна схема модуля збору інформації системи віброударної діагностики та акустичного каротажу (А – акселерометр; ПЕ – п'єзокарварцовий елемент)

Слід зазначити, що для оптимізації процесу передачі даних та зменшення їх обсягу при проведенні обстежень методом каротажу задається спеціальний режим упаковки даних. Суть його полягає у наступному. Пружні хвилі, викликані вібраційними коливаннями п'єзокварцових елементів, надходять до приймача коливань з певною затримкою. Оскільки відомі база прозвучування і максимальна швидкість поширення хвиль, то тривалість цієї затримки можна розрахувати. Таким чином, можна знехтувати деякою визначеного розміру вибіркою даних, і тим самим зменшити обсяг буфера даних, що передаються в комп'ютер. В результаті можна передавати однаковий за розміром буфер, незважаючи на різну базу прозвучування. Це значно спрощує структуру як програмної, так і апаратної частини, оскільки статичний розмір буфера дозволяє уникнути зайвого використання динамічної пам'яті та спростити структури даних для зберігання результатів вимірювання. В режимі луно-методу також записується буфер фіксованої довжини, надмірність інформації при обстеженні коротких паль може використовуватись для проведення аналізу не тільки у часовій, а і у частотній області.

При проведенні випробувань використовується автоматичне регулювання рівня підсилення, що зменшує навантаження на оператора. Фактичне значення коефіцієнта підсилення, як і значення лічильників енкодерів глибини, передаються у пакеті разом із основними даними вимірювань.

Елементи підсистеми реалізації луно-методу. Апаратура для підсистеми реалізації луно-методу не потребує розробки окремих електронних блоків. Для збудження пружних коливань використовується ударний молоток (рис. 4, а) з вбудованим датчиком прискорення та змінними насадками. Сигнал датчика прискорення використовується для запуску системи. Перевищення певного рівня прискорення (в момент удару) сигналізує системі, що необхідно розпочинати запис даних. Крім того, сигнал з датчика прискорення може бути використаний для уточнення параметрів матеріалу, по якому було здійснено удар. Сигнал з акселерометра надалі інтегрується та може використовуватись для проведення модального аналізу.

Для реєстрації сигналів хвильових процесів у палі використовуються датчики швидкості, аксе-

лерометри або інші датчики прискорення відповідного частотного діапазону (рис. 4, б), у конструкцію яких додається кріплення для фіксації датчика на поверхні оголовку палі. Для забезпечення акустичного контакту використовуються спеціальні акустичні мастики, що наносяться на очищену поверхню бетону.

Елементи підсистеми реалізації акустичного каротажу. Для реалізації методу акустичного каротажу в якості датчика сигналів доцільно застосовувати п'єзокварцові елементи циліндричної форми невеликого розміру, що пов'язано з розміром внутрішнього діаметра труб, призначених для каротажу в тілі мостових та будівельних конструкцій, які підлягають технічному діагностуванню. Датчики встановлюються однотипними завдяки тому, що всередині корпусу датчиків знаходяться тільки однотипні п'єзокварцові елементи, а їх електронні блоки винесені в центральний модуль управління. Це дає змогу використовувати датчики як взаємозамінні, тобто кожен датчик може виступати як у якості випромінювача сигналів, так і в якості приймача сигналів. Крім того, розміщення тільки п'єзокварцових елементів без електронних блоків у датчиках призводить до значного спрощення конструкції корпусів датчиків, що має велике значення для вирішення питання їх герметичності у водному середовищі труб, в які занурюються датчики при проведенні вимірювання, оскільки в таких умовах датчики перебувають під дією значного тиску.

Передача сигналів відбувається по кабелях значної довжини (до 100 м). Знаходження електронного блоку випромінювача в безпосередній близькості до МК дає можливість формування необхідних сигналів у самому МК для роботи датчика-випромінювача. МК виробляє два види сигналів управління електронним блоком випромінювача: серію сигналів «накачки» високої напруги на високовольтному трансформаторі та сигнал миттєвого розряду цієї напруги, в результаті чого в п'єзокварцовому елементі генеруються УЗ коливання, які поширюються в тілі досліджуваної конструкції. Структурна схема електронного блоку випромінювача зображена на рис. 5.

Оскільки електронний блок випромінювача генерує короткий (5 мс) високовольтний сигнал амплітудою приблизно 1000 В, який проходить по кабелю довжиною до 100 м до датчика, то виникає необхідність виконати гальванічну розв'язку цього блоку від інших електричних кіл універсальної системи акустичного каротажу та віброударної діагностики (ПК, інші електронні блоки). Для цього до складу електронного блоку введено наступні елементи: перетворювач напруги +5 В, яка надходить від USB порта ПК, в +12 В



Рис. 4. Молоток для проведення випробувань луно-методом (а) та адаптований для луно-методу датчик швидкості (б)

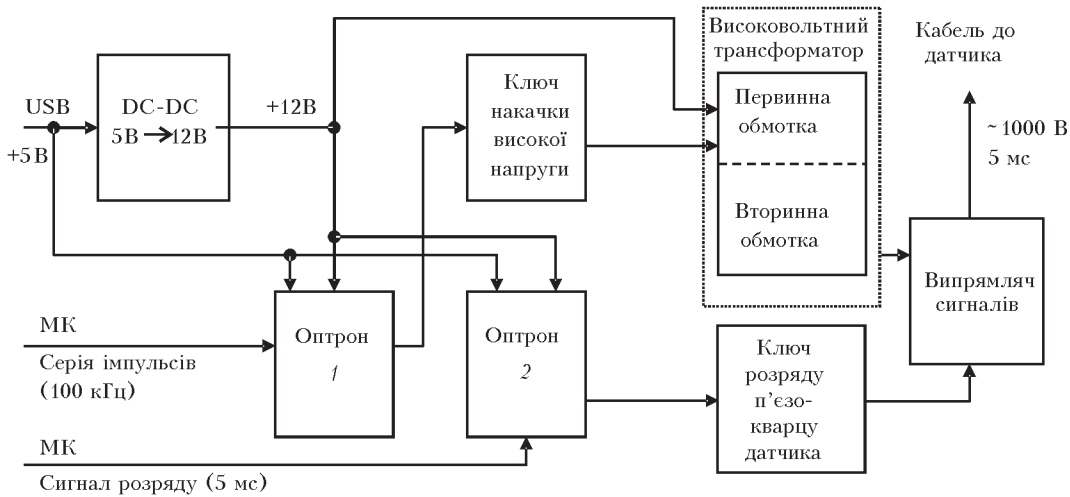


Рис. 5. Структурна схема електронного блоку випромінювача

з гальванічною розв'язкою цієї напруги; дві мікросхеми оптронів, що застосовані для гальванічної розв'язки сигналів МК від електронного блоку випромінювача. В такому разі такі елементи, як ключ накачки високої напруги, ключ розряду п'єзокварцового елемента датчика, високовольтний трансформатор, випрямляч сигналів, кабель з датчиком не мають електричного зв'язку з іншими колами вимірювальної системи.

Серія сигналів з частотою 100 кГц, які надходять з виходу оптрона 1 на вхід ключа накачки, запускає в роботу первинну обмотку високовольтного трансформатора з коефіцієнтом трансформації 100. При цьому амплітуда сигналів на його вторинній обмотці в кінці серії імпульсів тривалістю 5 мс досягає величини ≈ 1000 В. Після випрямлення напруги на вторинній обмотці трансформатора п'єзокварцовий елемент випромінювача буде заряджений до потенціалу такої ж величини. В кінці серії імпульсів накачки на МК виробляється імпульс тривалістю 20 мс, який через оптрон 2 надходить на ключ розряду для миттєвого розряду потенціалу на п'єзокварцовому елементі випромінювача. Часова діаграма роботи електронного блоку випромінювача зображена на рис. 6.

Розряд потенціалу на п'єзокварцовому елементі викликає появу УЗ коливань, які згасають протягом 20 мс. Поширюючись у тілі досліджу-

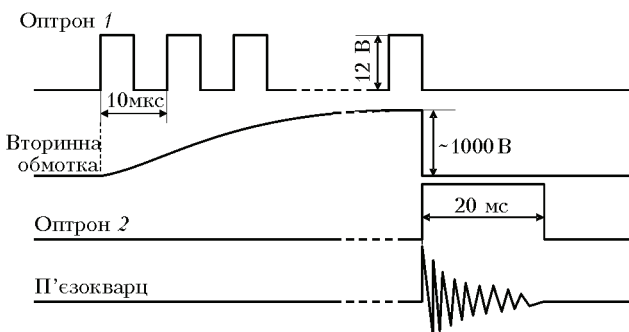


Рис. 6. Часова діаграма роботи електронного блоку випромінювача

ваної конструкції, ці коливання досягають приймача, в якому генеруються електричні сигнали з тією ж частотою, що і у випромінювача. При цьому важливо, щоб резонансні частоти обох п'єзокварцових елементів співпадали з достатньою точністю (допустима відмінність не більше 0,5 %).

Програмне забезпечення управління системою. Для проведення випробувань було розроблено спеціальне прикладне програмне забезпечення, яке дає можливість враховувати велику кількість параметрів для проведення обстежень, що необхідно для подальшого створення звітної документації. Програма влаштована таким чином, що всі випробування групуються у базі даних за наступними критеріями:

Фірма-замовник → Об'єкт замовника → Елемент Об'єкт → Номер/назва конструкції

Вибір даних критеріїв виконується оператором за допомогою візуальних компонентів перед початком обстежень.

Випробування відображаються у вигляді списку, який містить основні параметри конструкції. У випадку паль це: номер, проектна довжина, діаметр палі, також включається дата проведення обстеження.

Таким чином, для проведення нового обстеження необхідно спочатку вибрати чи задати параметри розташування конструкції. При цьому тип конструкції можна вибрати з переліку, а також є можливість для кожної конструкції додавати коментар, що надає допомогу при проведенні аналізу результатів обстежень.

Робочий екран проведення випробувань в режимі каротажу наведений на рис. 7. У його верхній лівій частині виводиться графік поточної реалізації хвильового процесу. У центральній частині екрану наводиться відображення у спеціальному режимі, де по вертикальній шкалі відкладаються значення лічильників енкодерів

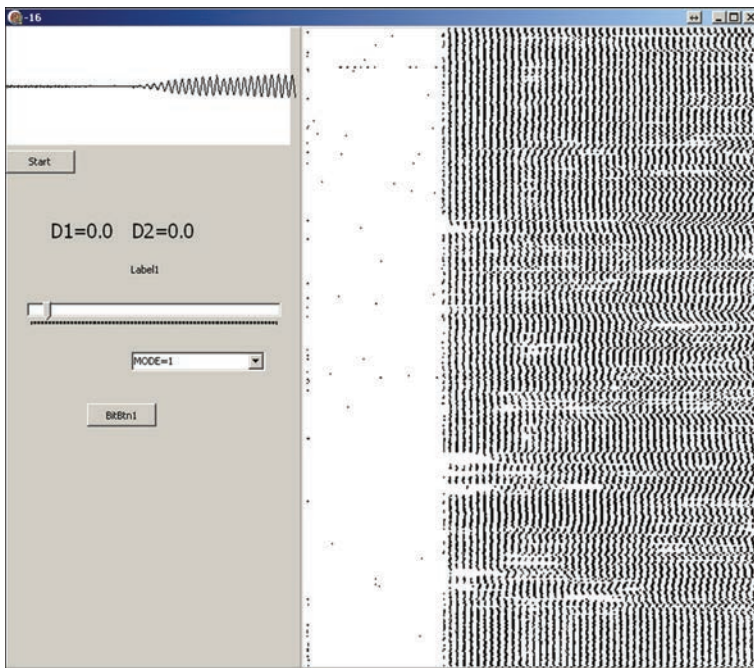


Рис. 7. Рабочий экран программы в режиме каротажа

глибини, а по горизонтальній шкалі з урахуванням бази прозвучування відтворюються значення реалізацій у режимі контрастності, що надає можливість контролювати весь процес каротажу по всій довжині палі.

Висновки

Таким чином, показано, що для достатнього повного та ефективного обстеження занурених у ґрунт бетонних паль особливо відповідальних об'єктів необхідно використовувати

у сукупності два методи дефектоскопії: віброударну діагностику на основі луно-методу та метод акустичного каротажу.

Розроблено та виготовлено експериментальний зразок системи акустичного каротажу та віброударної діагностики на основі п'єзокварцових елементів уніфікованої конструкції та удосконалених електронних блоків. Проведено його експериментальні випробування в умовах будівельних майданчиків із застосуванням спеціальної випробувальної апаратури.

Результати роботи можуть бути використані як при зведенні нових мостових та будівельних конструкцій, так і при відновленні об'єктів, частково зруйнованих внаслідок стихійних лих, техногенних та інших катастроф, у тому числі у східних регіонах України.

1. Городжа А. Д. Современный стан контролю якості залізобетонних паль і бурових стовпів / А. Д. Городжа, Б. О. Трошинський, В. П. Козел // Основи і фундаменти. – 2006. – Вип. 30. – С. 34–38.
2. Створення методів та системи ударної діагностики для визначення технічного стану та подовження ресурсу будівельних та мостових конструкцій / М. В. Мислович, А. Д. Городжа, Л. Б. Остапчук [та ін.] // Збірник наукових статей з цільової програми «Ресурс». – К.: Вид-во Ін-ту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, 2012. – С. 456–463.
3. Paquet J. Etude vibratoire des pieux en be'tonreponse harmonique et impulsionnelle. Application au controle / J. Paquet // Annales de l'Institut Technique du Batiment et des travaux Publics. – 1968. – Mai. – P. 794–803.

The paper presents the results of development of an all-purpose computer system, designed for flaw detection of bridge and building structures with application of methods of acoustic logging and vibration impact diagnostics. The main objective of project research was improvement of reliability and extension of service life at construction and reconstruction of bridge and building structures through development and introduction of respective technical means. Application of the developed system will allow determination of the degree of reliability of load-carrying concrete structures, in particular at restoration of objects partially destroyed as a result of natural disasters, technogenic and other catastrophes.

Keywords: building and bridge structures, vibration impact diagnostics, acoustic logging technique

Надійшла до редакції
06.05.2016

НОВАЯ КНИГА

ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СВАРКЕ И ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ. – Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2016. – 98 с. (электронное издание <http://patonpublishinghouse.com/proceedings/ltwmp2015book.pdf>).

Сборник содержит доклады, представленные на Седьмой международной конференции «Лазерные технологии в сварке и обработке материалов», 14–18 сентября 2015 г., Одесса, Украина, в которых отражены последние достижения в области лазерной сварки, резки, наплавки и других современных технологий лазерной обработки материалов. Рассматриваются перспективы применения лазерных технологий. Авторами докладов являются известные ученые и специалисты из нескольких стран мира. Архив предыдущих шести конференций «Лазерные технологии в сварке и обработке материалов» на сайте: <http://patonpublishinghouse.com/proceedings/ltwmp>

ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА И НАДЕЖНОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ АКТИВНЫХ ЗОН УКРАИНСКИХ АЭС ЗА СЧЕТ ОПТИМИЗАЦИИ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ И МИКРОЛЕГИРОВАНИЯ

А. А. АВТУШКО, Р. Л. ВАСИЛЕНКО, О. В. БОРОДИН, В. Н. ВОЕВОДИН, А. С. КАЛЬЧЕНКО,
Ю. Э. КУПРИЯНОВА, Р. И. ЛЫМАРЬ, Е. А. НАЗАРЕНКО, А. Б. ШЕВЦОВ

Нац. научный центр «Харьковский физико-технический институт».
61108, Харьков, ул. Академическая, 1. E-mail: r.vasilenko@kipt.kharkov.ua

Создана методика имитационных экспериментов на ускорителе и проведено облучение образцов труб из циркониевых сплавов E110, E110M, E125 ионами циркония до высоких повреждающих доз (20...50 сна). Определены дозные зависимости параметров (размер, плотность) радиационно-индуцированных дислокационных петель *c*-типа, образование которых коррелирует с ускоренной стадией радиационного роста. Исследовано радиационно-индуцированное изменение химического состава выделений второй фазы. Показано, что легирование железом значительно уменьшает размеры радиационно-индуцированных дислокационных петель *c*-типа, таким образом, подавляя радиационный рост. Библиогр. 6, рис. 18, табл. 1.

Ключевые слова: ресурс, надежность, активные зоны реакторов, оптимизация структурного состояния, микролегирование

Проблемы разработки циркониевых материалов, применяемых в условиях облучения, требуют использования облучающих устройств для определения механизмов радиационного повреждения и отбора материалов с высокой радиационной стойкостью. Эти эксперименты можно проводить при нейтронном облучении в существующих ядерных устройствах. Однако нейтронное облучение требует длительных выдержек образцов в радиационном поле до 5 лет для ВВЭР, или до двух лет в исследовательском реакторе БОР-60. Большие скорости набора дозы (10^{-2} ... 10^{-3} сна/с) при ионном облучении значительно превышают скорости набора дозы в существующих исследовательских и энергетических реакторах (10^{-6} ... 10^{-8} сна/с). Использование пучков заряженных частиц, имеющих сечение взаимодействия с атомами решетки на много порядков больше, чем нейтроны, позволяет создавать радиационные дефекты ускоренным путем. Такая методика дает возможность точного контроля параметров эксперимента и огромный выигрыш во времени, особенно в тех случаях, когда надо прогнозировать поведение материалов при высоких флюенсах нейтронов. Имитационные эксперименты имеют и другие преимущества: точный и непрерывный контроль параметров облучения, возможность дифференциального и непосредственного исследования различных факторов, влияющих на эволюцию дефектной структуры при облучении, отсутствие наведенной активности, относительная

дешевизна проведения экспериментов. Целью настоящей работы является:

- разработка методик облучения и проведение исследований возможности экспериментального моделирования радиационной структуры циркониевых сплавов для прогнозирования склонности циркониевых изделий к радиационному росту;
- определение взаимосвязи микроструктуры и условий облучения заряженными частицами в широком диапазоне доз и температур;
- сравнение с облучением нейтронами.

Материалы и методика. Разработана следующая технология препарирования образцов.

1. *Сегментация трубки ТВЭЛа.* Резка трубок проводилась на установке Low Speed Saw IsoMet в два этапа: вдоль оси на два полукольцевых сегмента длиной 18 мм и поперек трубки, для отделения сегментов.

2. *Химическое истончение сегментов.* Сегменты, вырезанные из оболочки ТВЭЛа, утонялись до толщины 200 мкм путем периодического кратковременного погружения в раствор 45 % H_2O_2 , – 45% HNO_3 , – 10 % HF при температуре реактива 70 °C с последующей промывкой в этаноле.

3. *Разгибание сегментов* в плоские пластины проводилось в тисках через прокладки из полированной нержавеющей стали.

4. *Механическое шлифование* проводилось для удаления неровностей после разгибания и удаления наклепаного слоя. Шлифовка пластин прово-

дилась на мелкозернистых шлифовальных бумагах с обеих сторон пластины толщиной 100 мкм.

5. *Анализ текстуры* исследуемого материала. Определение текстуры образцов проводили методом дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD) с помощью блока HKL на микроскопе JSM-7001F. Текстура определялась на отполированных пластинах из исследуемого материала, ориентированных в соответствии с направлением прокатки твэльных труб. Необходимость этой методики вызвана поставленными задачами по исследованию эволюции с-петель под облучением.

Как известно, петли данного типа находятся в базисных плоскостях. Для их изучения необходимо расположить образец таким образом, чтобы базовая плоскость находилась параллельно пучку электронов в трансмиссионном электронном микроскопе. Поскольку гониометр трансмиссионного микроскопа имеет ограничения по углу наклона 45° , то знание ориентационных характеристик зерен образца поможет располагать образец в держателе микроскопа таким образом, чтобы увеличить долю зерен, в которых базисные плоскости находятся параллельно пучку электронов. На рис. 1 приведены прямые и обратные полюсные фигуры исследуемых сплавов циркония. Как видно из данных рисунков, базисные плоскости преимущественно расположены в плоскости, перпендикулярной оси трубки и перпендикулярны поверхности трубки, с небольшим ($10...20^\circ$) интервалом оси (0001). Таким образом, если нанести на образец, который вырубается, метку направления оси трубки, то при дальнейшем электронно-микроскопическом исследовании возможно расположить образец в держателе микроскопа в условиях совпадения оси гониометра и оси трубки ТВЭЛа.

6. *Вырубка трехмиллиметровых дисков с циркониевых образцов.* Образцы для исследований в виде трехмиллиметровых дисков вырубались из исходной фольги толщиной около 100 мкм с помощью пуансона путем штамповки. Глубина слоя с деформированной структурой в этом случае не превышала 10 мкм.

7. *Подготовка образцов к облучению.* Препарирование мишеней для облучения в ускорителе ЕСУВИ проводилось методом струйной электрополировки с одной стороны образца. Электрополировка проводилась на установке Tenupol-5, в электролите, состоящем из 90 % C_2H_5OH и 10 % $HClO_4$ при напряжении 50 В и температуре электролита $-50^\circ C$ в течение 10 с.

8. *Препарирование облученных образцов.* Для достижения необходимой глубины слоя материала, в котором проводится электронно-микроскопическое исследование, применялся метод струйной электрополировки с импульсной подачей тока. Снятие приповерхностного слоя (100 нм) с облученной стороны проводилось на установке Tenupol-5, в электролите 90 % C_2H_5OH , – 10 % $HClO_4$, при напряжении 75 В, и температуре электролита $-50^\circ C$. Для контролируемого снятия тонкого слоя материала установка Tenupol-5 была оборудована системой стабилизации тока и контроллером подачи импульса.

В схеме установки для электрополировки образцов (рис. 2) толщина снятого слоя задавалась с помощью установки времени нахождения полирующей струи на образце. Тем самым время полировки было постоянным и не менялось в процессе. Так как толщина снятия слоя с поверхности образца зависит не только от времени полировки, но и от значения тока, которое, в свою очередь, меняется при изменении температуры электролита и изменении скорости струи, то точно обеспе-

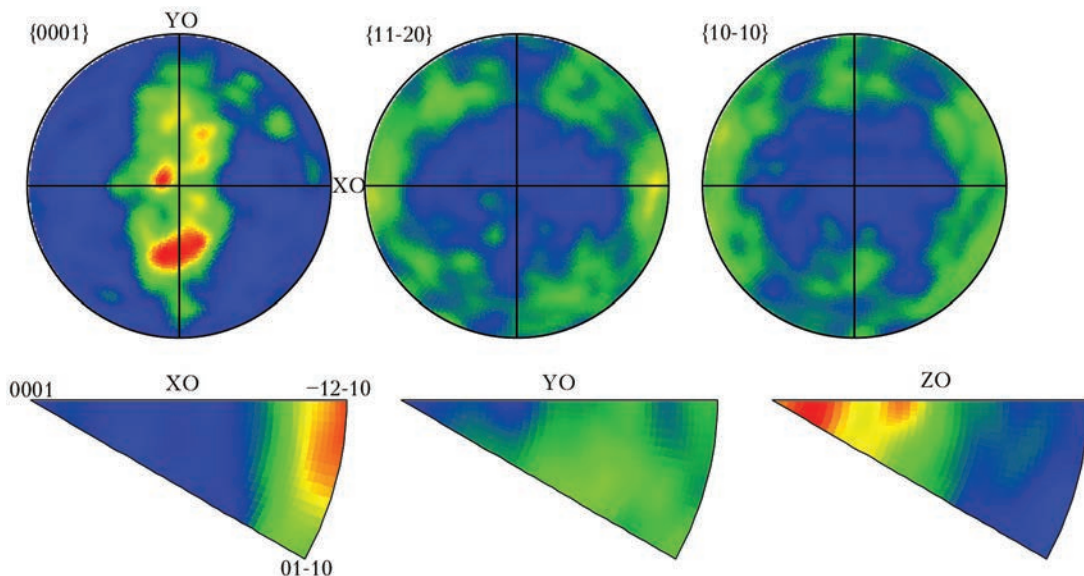


Рис. 1. Прямые и обратные полюсные фигуры труб из сплава E110

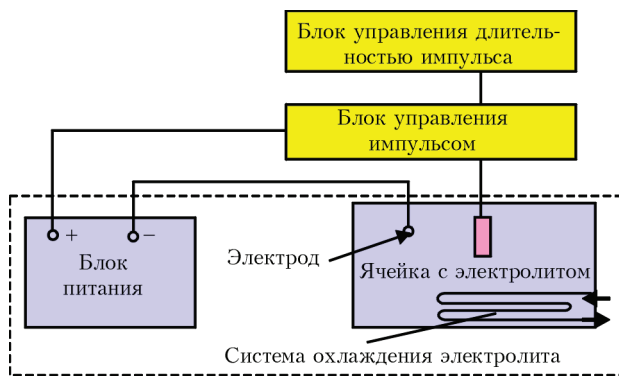


Рис. 2. Схема установки для электрополировки

чить удаление необходимой толщины слоя в процессе полировки невозможно. Это потребовало изменения установки для электрополировки.

В работе использовалась система электрополировки образцов (рис. 3), в которой импульс задается по количеству тока, протекающего через образец в единицу времени: заряд устанавливается на датчике импульса в диапазоне от 1 до 198 мКл. Тем самым, в процессе электрополировки изменение температуры электролита, в свою очередь, приводит к изменению тока полирующей струи, величина заряда остается постоянной, так как при уменьшении тока увеличивается время и наоборот. Таким образом, толщина снятия импульсом слоя с поверхности образца не меняется в процессе электрополировки. В данной схеме предусмотрено два режима работы: 1) блок стабилизации тока отключен; 2) блок управления импульсом отключен (данный режим используется, чтобы приготовить образец для исследования на трансмиссионном микроскопе). Предложенная схема установки для электрополировки образцов совместима со стандартной установкой струйной электрополировки для трансмиссионной электронной микроскопии TenuPol-5, производства фирмы «Struers».

Окончательное приготовление образцов до толщины, пригодной для исследования в ТЭМ, проводилось методом стандартной струйной электрополировки [1, 2] в установке типа «TenuPol» со стороны необлученной поверхности. При этом на

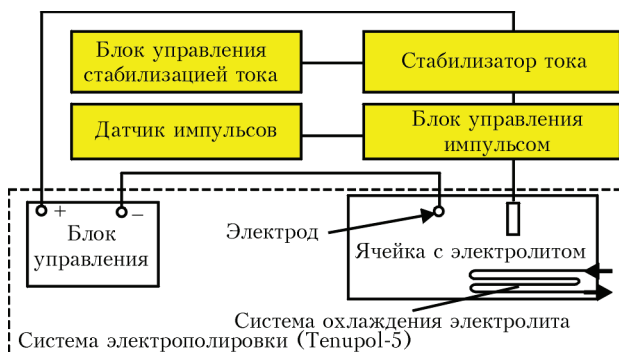


Рис. 3. Схема системы для электрополировки (толщина снятия слоя с поверхности образца задается установкой количества электричества)

облученную сторону образца наносился слой лака, который защищал ее от растворения. Условия электрополировки: напряжение 70 В, температура электролита – комнатная, состав электролита 80 % C_2H_5OH , – 10 % $HClO_4$, – 10 % $C_3H_8O_3$. При появлении в образце отверстия полировка прекращалась. Образец извлекался из тefлонового держателя, промывался в спирте, а затем в ацетоне до растворения защитной лаковой пленки. Окончательная промывка осуществлялась в этиловом спирте.

Облучения на ускорителе ЕСУВИ. Облучение образцов проводилось на электростатическом ускорителе с внешним инжектором (ЕСУВИ ННЦ ХФТИ). Контроль и регулирование температуры нагревателя проводились с помощью системы управления, соединенной с термопарой, укрепленной в подложке мишеней и используемой в качестве датчика температуры. Особое внимание уделялось обеспечению хорошего термодатчика между образцами и подложкой. Ошибки в измерении температуры не превышали $\pm 5^\circ C$. Ток ионного пучка в процессе облучения измерялся с помощью микроцилиндров Фарадея, установленных над образцом. Ошибки определения тока пучка, а следовательно, и дозы повреждения не превышали $\pm 5\%$. Вакуум во время облучения был не ниже $1,3 \cdot 10^{-4}$ Па. Образцы облучались ионами циркония с энергией 1,8 МэВ в интервале температур 325...560 $^\circ C$. Скорость создания смещений в исследуемой области образцов составляли 10^{-2} сна/с (плотность тока 10 мкА/см²).

Результаты исследования исходной структуры и фазового состава образцов сплава Э110. По данным металлографических исследований структура штатного сплава E110 является стабилизированной с равномерными углами разориентации. Размеры зерен у сплавов, определенные методом секущей, лежат в пределах 3...5 мкм. Поверхность шлифов исследуемого сплава является гладкой, ровной, без выявления особых структурных особенностей. Наблюдаются гидридные выделения и полупрозрачные кристаллические образования с правильной огранкой. Однако такие выделения крайне редки и их размеры не выходили за рамки требований технических условий для сплава Э110. Других мелких включений явно примесного и загрязняющего характера на шлифах не наблюдалось. После травления в смеси азотной и плавиковой кислот на поверхности шлифа оказываются ямки травления в виде питтинга, количество которых увеличивается с продолжительностью травления.

Исследование сплава Э110 с помощью электронного микроскопа показало, что в исходном состоянии сплав имеет двухфазную структуру: α -матрица + выделение β -ниобия (рис. 4). Средний размер выделений β -ниобиевой фазы около 50 нм, а концентрация около $3 \cdot 10^{20} м^{-3}$. Кроме

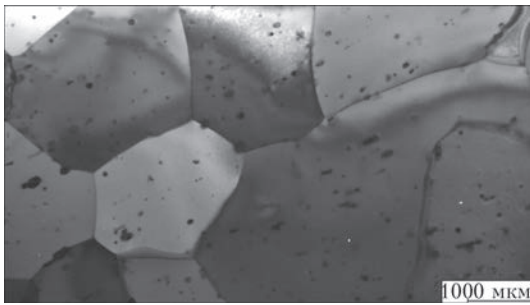


Рис. 4. Микроструктура сплава Э110 в исходном состоянии

β -Nb фазы наблюдается небольшое количество карбидов типа MX с примерно равным содержанием циркония и ниобия. Плотность дислокаций при облучении составляет $6...7 \cdot 10^{10} \text{см}^{-2}$. Размер зерна в интервале 3...5 мкм.

Исследование экстракционных реплик с помощью энергодисперсионного анализа (EDS) показало, что в β -ниобиевой фазе содержание циркония колеблется в интервале 18...27 %, а ниобия 77...82 %. Также наблюдаются отдельные карбиды с примерно равным содержанием ниобия и циркония. Результаты EDS анализа приведены на рис. 5 и в таблице.

Исследование исходной структуры и фазового состава образцов сплава Э125. В исходном состоянии в сплаве Э125 (состав Zr + 2,5 % Nb) наблюдаются три фазы (α -циркониевая матрица и выделения β -циркониевой фазы, а также β -ниобиевой фазы). Размер зерен α -циркония от 3 до 10 мкм (рис. 6), зерна равноосные. Фаза β -Zr (92 % Zr–8 % Nb), в виде отдельных зерен размером от 0,5 до 3 мкм имеет ОЦК-решетку с параметром 0,33 нм. Как правило, выделения β -циркониевой фазы расположены по границам α -зерен, β -Nb фаза (7 % Zr–93 % Nb), глобулярной формы, располагается неоднородно в теле зерен и по грани-

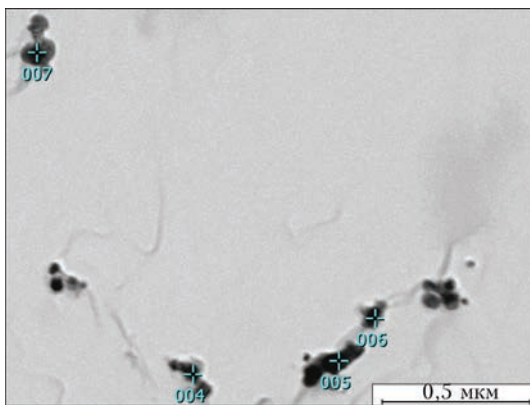


Рис. 5. Экстракционная реплика Э110 в исходном состоянии

Состав выделений в сплаве Э110 в исходном состоянии

Фаза	Zr	Nb	Всего, мас. %
β -Nb	25,98	74,02	100,00
MC	36,09	63,91	100,00
β -Nb	18,89	81,11	100,00
β -Nb	17,99	82,01	100,00

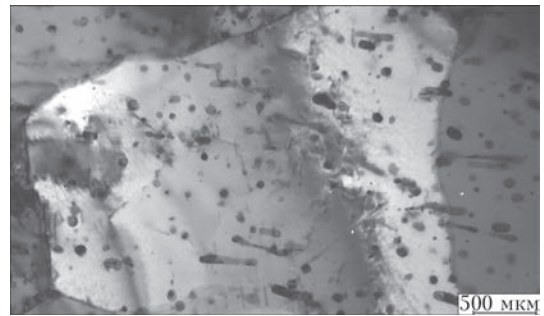


Рис. 6. Микроструктура сплава Э125 в исходном состоянии

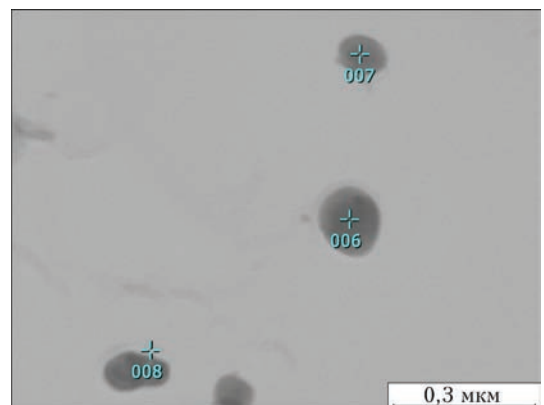
цам в виде скоплений. Ее размер от 0,02 до 0,4 мкм. Она имеет ОЦК решетку с параметром 0,35 нм.

На рис. 7 приведены результаты рентгеноспектрального анализа реплик сплава Э125. Как видно, в состав β -Nb фазы входят два элемента: цирконий и ниобий. Следует отметить, что ниобия больше, чем в аналогичной фазе в сплавах E110 и E110 M и составляет 89...91 %.

Сплав Э110. В исходном состоянии сплав имеет трехфазную структуру: α -матрица + выделения β -ниобия + выделение фазы Лавеса Zr (Nb, Fe)₂. Средний размер выделений β -ниобиевой фазы около 50 нм, а концентрация около $3 \cdot 10^{20} \text{м}^{-3}$ (рис. 8). Средний размер выделений фазы Лавеса 90 нм, а их концентрация $8 \cdot 10^{19} \text{м}^{-3}$. Размер зерна порядка 5 мкм.

На рис. 9 приведен результат рентгеноспектрального анализа выделений вторых фаз сплава E110M, сделанного с тонких фольг. Результаты рентгеноспектрального анализа подтверждают результаты фазового дифракционного анализа.

Облученное состояние. Облучение сплава Э110 при температуре 390 °С в интервале доз 20...30 сна приводит к образованию радиационно-индуцированных дислокационных петель и дислокационной сетки. Микроструктура сплава Э110 после облучения до дозы 25 сна при тем-



Реплика	Zr	Nb	Всего, мас. %
006	10,88	89,12	100
007	12,96	87,04	100
008	8,92	91,08	100

Рис. 7. Рентгеноспектральный анализ экстракционной реплики сплава Э125 в исходном состоянии

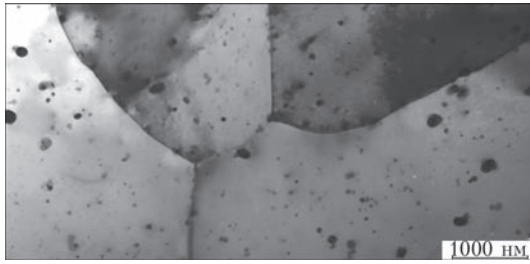
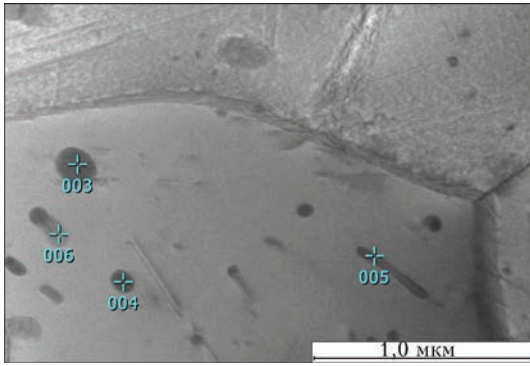


Рис. 8. Микроструктура сплава Э110М в исходном состоянии



Реплика	Fe	Zr	Nb	Всего, мас. %
003	12,04	62,20	25,76	100,00
004	0,21	58,74	41,05	100,00
005	0,15	85,36	14,49	100,00
006	2,73	90,49	6,77	100,00

Рис. 9. Результаты рентгеноспектрального анализа тонкой фольги сплава Э110М в исходном состоянии

пературе 390 °С приведена на рис. 10. В структуре материала наблюдаются эллиптические дислокационные петли и элементы дислокационной сетки. Дислокационные петли отнесены к петлям *a*-типа, они имеют вектор Бюргерса $\langle 1120 \rangle$ (рис. 10, *a*). По мере роста дозы облучения увеличивается размер эллиптических дислокационных петель и их плотность. При облучении до дозы

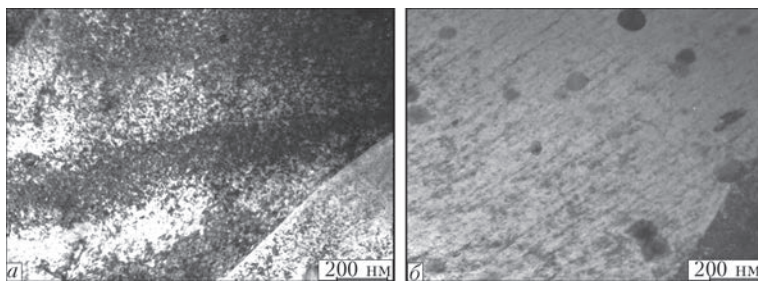
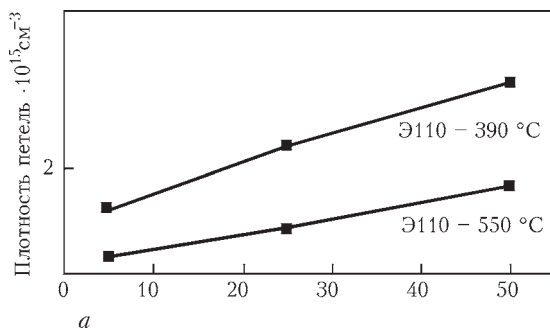


Рис. 10. Микроструктура сплава Э110 (25 сна, 390 °С): *a* – *a*-петли; *б* – *c*-дислокации



20 сна, кроме петель *a*-типа, образуются петли *c*-типа, т.е. петли, имеющие *c*-компоненту вектора Бюргерса $\langle 0002 \rangle$ (рис. 10, *б*). С ростом дозы до 30 сна средний размер петель растет, а концентрация мало зависит от дозы облучения. Для 550 °С при повреждающей дозе 50 сна размер петель *a*-типа достигает 21,3 нм, а плотность $1,8 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$ (рис. 11).

В сплаве Э110М в результате облучения при 390 °С образовались дислокационные петли различных типов и дислокационная сетка (рис. 12).

По мере повышения дозы средний размер *c*-петель увеличивается от 56 до 90 нм, их концентрация слабо зависит от дозы и постоянна на уровне $2 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$ (рис. 13).

В сплаве Э125 с ростом дозы облучения средний размер *c*-петель также увеличивается от 63 до 130 нм, а концентрация слабо зависит от дозы и постоянна на уровне $1,5 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$ (рис. 14, *a*). В распределении *a*-петель наблюдается упорядочение, характерное для нейтронного облучения (рис. 14, *б*).

Таким образом, с ростом дозы облучения средний размер петель в интервале 20...30 сна растет, в то время как концентрация остается постоянной (рис. 15). Это характерно для сплавов Э110, Э110М и Э125. Следует отметить, что для сплава Э110М в данном интервале доз петли *c*-типа имеют наименьший размер, но более высокую плотность. Из этого можно сделать вывод, что сплав E110М характеризуется более высокой устойчивостью к радиационному росту, чем другие сплавы.

Обсуждение результатов. Преимущества имитационной методики, а именно, значительно более высокая скорость создания повреждений, точность и контролируемость параметров облучения и информативность электронно-микроскопического и рентгеноспектрального исследований необходимо было дополнить количественным анализом микроструктурных элементов, позволяющих оценить макросвойства сплавов при облучении нейтронами.

Таким образом, целью данной работы было показать подобие радиационных процессов при различных видах облучения, выработать критерии подобия между облучением заряженными части-

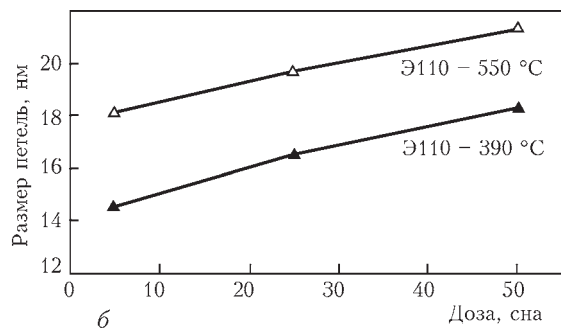


Рис. 11. Эволюция петель *a*-типа в сплаве Э110: *a* – плотность; *б* – размер

цами и нейтронами и выявить параметры, по которым можно определять макросвойства сплавов при эксплуатации в реакторе.

Сравнение закономерностей эволюции микроструктуры и фазового состава различных циркониевых сплавов позволило выявить роль легирующих элементов в микрохимических и диффузионных процессах. Особенное внимание было уделено петлям *c*-типа, появление которых связывают с радиационным ростом циркониевых сплавов [1, 5]. Так, с ростом дозы облучения средний размер петель в интервале 20...30 сна растет, в то время как концентрация остается постоянной. Это характерно для сплавов Э110, Э110М и Э125. Для сплава Э635М петли *c*-типа наблюдались только при дозе 30 сна. Таким образом, сплав Э635М характеризуется большим инкубационным периодом образования петель *c*-типа, чем остальные сплавы.

Пороговую дозу образования *c*-петель для сплавов Э110, Э110М и Э125 определить не удалось, но, экстраполируя зависимости среднего размера петель от дозы, можно предположить, что зарождение петель в данных сплавах происходит в близком ин-

тервале доз, а основные различия наблюдаются в величине концентрации и среднего размера. Самая высокая скорость роста среднего размера петель была обнаружена в сплаве Э110, самая низкая – в сплаве Э110М. Сплав Э125 занял промежуточное положение по этому параметру. Исходя из различий в химических составах этих сплавов, можно предположить, что увеличение содержания Nb в сплаве Э125 по сравнению с Э110 слабо влияет на процесс образования петель *c*-типа, в то время как добавка Fe в сплав Э110М значительно уменьшила скорость роста среднего размера петель данного типа. В сплаве Э635М образование петель *c*-типа было полностью подавлено до дозы 30 сна. В данной работе была предложена модель, позволяющая по количественным характеристикам дислокационной структуры оценить (в первом приближении) массоперенос вещества, который может дать значительный вклад в формоизменение изделий из этих сплавов (рис. 16).

Исходя из того, что *c*-петли имеют вакансионное происхождение и лежат в основном в базисных плоскостях, знание размера и концентрации

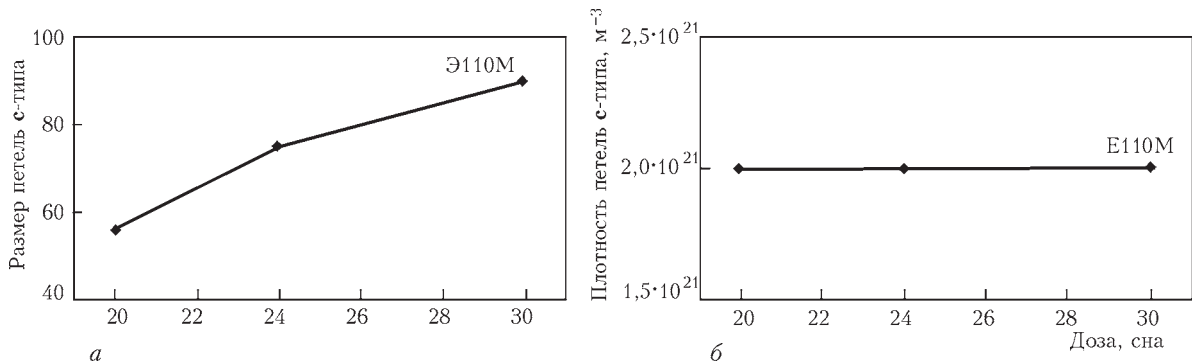


Рис. 12. Дозная зависимость параметров петель *c*-типа в сплаве Э110 М при температуре облучения 390 °С

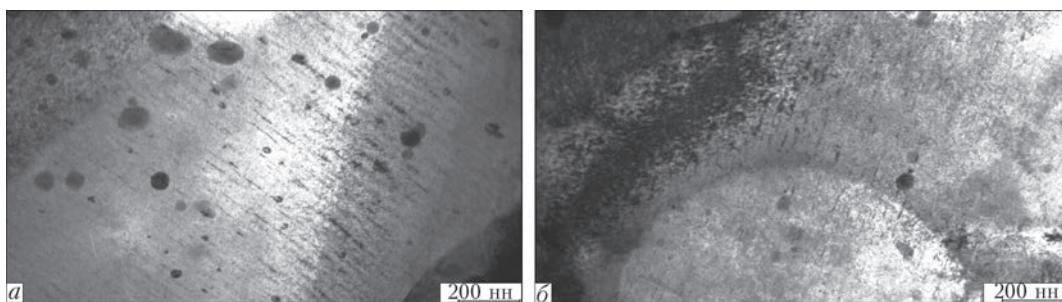


Рис. 13. Дислокации *c*-типа в сплаве Э110 М, облученного при температуре 390 °С: а – 20; б – 30 сна

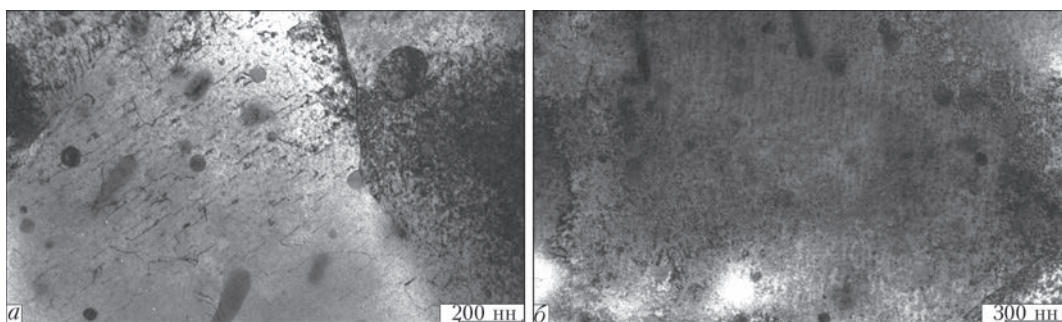


Рис. 14. Дислокации *c*-типа (а), упорядочение петель *a*-типа (б) в сплаве Э125; облучение 20 сна, температура 390 °С

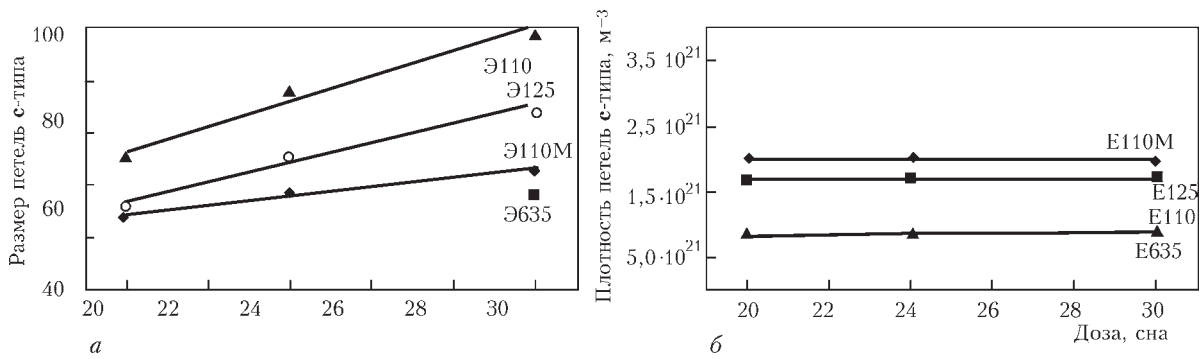


Рис. 15. Зависимость среднего размера (а) и концентрации (б) петель с-типа в циркониевых сплавах, облученных при температуре 390 °С

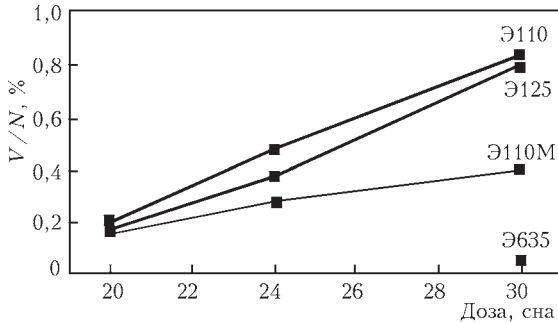


Рис. 16. Изменение относительной объемной доли материала за счет образования с-петель в циркониевых сплавах после облучения тяжелыми ионами при температуре 390 °С

этих петель позволяет посчитать объем материала, перераспределившегося из базисных плоскостей на призматические плоскости по формуле:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\pi d^2 c}{8} N \cdot 100 \%,$$

где $\Delta V/V$ – перераспределенный объем, %; d – диаметр петель с-типа, м; c – параметр решетки, м; N – концентрация петель, м⁻³.

Этот объем является интегральной характеристикой петель с-типа и позволяет сравнивать сплавы, имеющие разные плотности и размеры

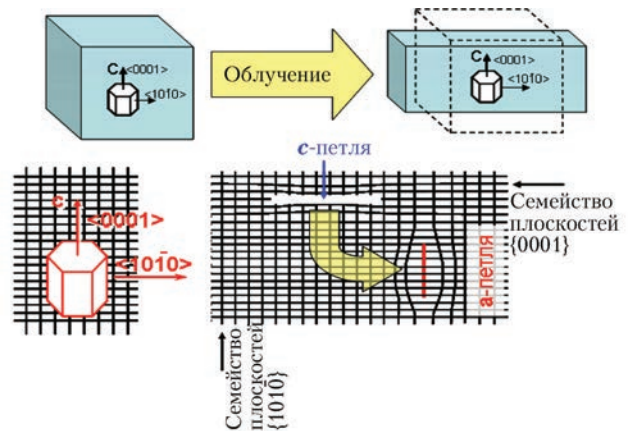


Рис. 17. Механизм перераспределения материала под облучением в цирконии

одномерных дефектов петель с-типа. Таким образом, образование вакансионных петель с-типа в базисных плоскостях приводит к ориентационно направленному переносу атомов вещества на призматические плоскости и, как следствие, формоизменению материала. Сравнение относительных перемещенных объемов исследованных сплавов позволяет сделать вывод, что сплав Э110 более всего подвержен формоизменению, а сплав Э110М имеет значительную радиационную сопротивляе-

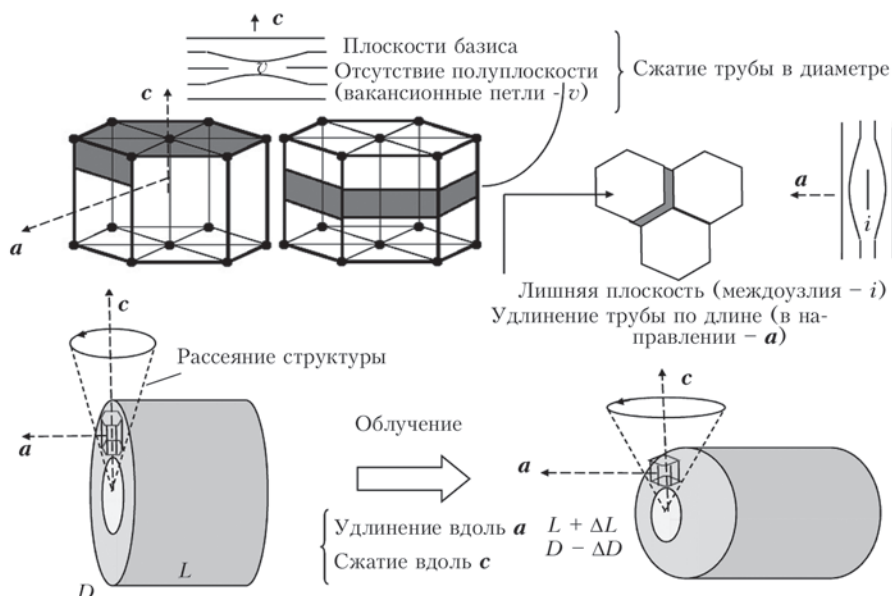


Рис. 18. Схема влияния распределения междуузельных и вакансионных петель на радиационный рост оболочечной трубы

мость этому явлению в исследованном интервале условий облучений. Анализ результатов деформации радиационного роста и микроструктуры после нейтронного облучения показал, что плотность дислокаций *c*-типа повышена в сплавах, испытывающих значительный рост (рис. 18) [6].

По современным представлениям основным фактором, определяющим стадию ускоренного радиационного роста, является эволюция дислокационной структуры.

На ранних стадиях облучения формируются дислокационные петли (преимущественно междоузельные) в призматических плоскостях, имеющие вектор Бюргерса *a*-типа, что сопровождается умеренным радиационным ростом. После достижения некоторого порогового флюенса (разного для сплавов разного состава) наступает ускорение радиационного роста.

При этом наблюдается появление *c*-компонентных дислокационных петель (вакансионных). По мере увеличения дозы облучения их плотность растет, поскольку потоки вакансий направлены на базисные или пирамидальные плоскости, а междоузлия стабилизируют *a*-петли в призматических плоскостях (рис. 18).

Выводы

Полученные данные о влиянии облучения ионами Zr^{+6} сплавов циркония с энергией 2 МэВ и скоростью повреждения 10^{-2} сна/с на микроструктуру и фазовый состав обнаружили ряд явлений, имеющих место и при облучении этих сплавов нейтронами.

Показано, что в ускорителе всего лишь за 1:00 возможно создать радиационные повреждения, характерные для нейтронного облучения в реакторе в течение нескольких лет.

Показана принципиальная возможность создания радиационных повреждений в виде дислокационных петель *a*- и *c*-типов (типичных для

нейтронного облучения) при контролируемых температурах в циркониевых сплавах.

Размер и плотность дефектов сопоставимы со структурой после нейтронного облучения.

Микрoхимическая эволюция (обеднение выделений фазы Лавеса железом и обогащения матрицы) при облучении тяжелыми ионами проходит аналогично наблюдаемому при облучении нейтронами [1, 5].

Уровень повреждающих доз, достигнутый в работе при ионном облучении на ускорителе (до 50 сна), намного превышает уровень доз при облучении в реакторе ВВЭР-1000 даже в течение 8–10 лет, что позволяет сделать прогноз о поведении циркониевых сплавов при высоких выгораниях.

1. Shishov V. N. The Evolution of Microstructure and Deformation Stability in Zr–Nb–(Sn, Fe) Alloys under Neutron Irradiation / V. N. Shishov // Proc. of 16th International Symposium on Zirconium in the Nuclear Industry, Chengdu, China, 2009, ASTM STP 1529, ASTM International, West Conshohocken, PA. – 2012. – P. 37–66.
2. Модернізація прискорювача ЄСУВІ для одночасного опромінення сталі X18N10T іонами хрому, гелію та водню різних енергій / О. В. Бородин, В. В. Брик, Р. Л. Василенко [и др.]. // Цільова комплексна програма НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій споруд та машин»: Збірник наук. ст. за результатами, отриманими в 2007–2009 рр. Науковий керівник – академік Б. Є. Патон. Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ, 2009.
3. Ziegler J. F. SRIM2006 – The Stopping and Range of Ions in Matter Version 2006 [Electronic resource] / J. F. Ziegler, J. P. Biersack // Program, IBM Corp. – Yorktown, NY, USA, 2006. – Code available in: <http://www.srim.org>.
4. Electron Backscatter Diffraction in Materials Science / Ed. by Adam J. Schwartz, Mukul Kumar, Brent L. Adams // 2000 Kluwer Academic/Plenum Publishers, 233 Spring Street, New York, N.Y. 10013.
5. Воеводин В. Н. Эволюция структурно-фазового состояния и радиационная стойкость конструкционных материалов / В. Н. Воеводин, И. М. Неклюдов. – К.: Наукова думка, 2006. – 376 с.
6. Griffiths M. Evolution of microstructure in hcp metals during irradiation / Griffiths M. // Journal of Nuclear Materials. – 1993. – Vol. 205. – P. 225.

Procedure of simulation experiments in an accelerator was developed and irradiation of pipe samples from E110, E110M, E125 zirconium alloys by zirconium ions up to high damaging doses (20 – 50 sna) was performed. Dose dependencies of parameters (size, density) of radiation-induced *c*-type dislocation loops were determined, their formation correlating with accelerated stage of irradiation growth. Influence of radiation-induced change of chemical composition of second phase precipitates was studied. It is shown that iron alloying significantly reduces the dimensions of radiation-induced *c*-type dislocation loops and, thus, suppresses irradiation growth. 6 References, 18 Figures, 1 Table.

Keywords: residual life, reliability, reactor active zones, structural state optimization, microalloying

Поступила в редакцию
06.05.2016

КОМПЛЕКСНЫЙ ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ВНУТРЕННИХ ДЕФЕКТОВ В СВАРНОМ СОЕДИНЕНИИ УЗЛА ПРИВАРКИ КОЛЛЕКТОРА К КОРПУСУ ПАРОГЕНЕРАТОРА ЭНЕРГОБЛОКА ВВЭР-1000

Л. С. ОЖИГОВ, А. С. МИТРОФАНОВ, Г. Д. ТОЛСТОЛУЦКАЯ, Е. А. КРАЙНЮК, С. В. ШРАМЧЕНКО

Нац. научный центр «Харьковский физико-технический ин-т». 61108, Харьков-61, ул. Академическая, 1.

E-mail:ozhigov@kipt.kharkov.ua

Методами коэрцитиметрии и магнитной памяти выполнен диагностический контроль напряженно-деформированного состояния металла узлов приварки коллекторов к корпусу парогенератора ПГВ-1000М после длительной эксплуатации на энергоблоке № 3 Южно-Украинской АЭС. Проанализированы результаты комплексных исследований состояния металла. Обнаружены и идентифицированы микротрещины, поры и неметаллические включения, определен их состав. Исследовано изменение микротвердости металла по высоте сварного шва. Показано, что в зоне корня шва содержание водорода в три раза выше, чем на других участках металла сварного соединения. Библиогр. 21, табл. 1, рис. 13.

Ключевые слова: парогенератор, сварное соединение, эксплуатационные дефекты, микроструктура металла, термодесорбция, водород, напряженно-деформированное состояние, магнитные методы диагностики

За время эксплуатации энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000 имели место повреждения в узлах приварки коллекторов к патрубки Ду1200 корпусов парогенераторов – сварные соединения №111. Повреждения проявляются в виде различных несплошностей, чаще микро- или сквозных макротрещин. На протяжении последних 17 лет (с 1998 по 2015 гг.) было проведено свыше 30 ремонтов сварного соединения (СС) № 111. По результатам исследований было предложено несколько гипотез о вероятных причинах возникновения дефектов: недостатки конструкции, нарушение технологии при изготовлении, вероятные перегрузки при останове и пуске реактора, взаимное влияние коррозионно-активной среды второго контура и циклических нагрузок. Окончательно причины

повреждений СС № 111 на энергоблоках АЭС до последнего времени так и не определены.

Выявление несплошностей в металле сварного соединения № 111 и оценка существующих методов контроля. Во время планово-предупредительных ремонтов (ППР) энергоблоков дефекты с определенной точностью фиксируются с помощью применяемых методов НК: ультразвукового (УЗК) и капиллярного. В отдельных случаях трещины могут распространяться через всю толщину стенки патрубка и выходить на поверхность (рис. 1, толщина стенки около 70 мм) [1].

Но чаще дефекты обнаруживаются в глубине металла и на внутренней стороне конструкции, граничащей с теплоносителем. Исследования показали, что дефекты, расположенные в

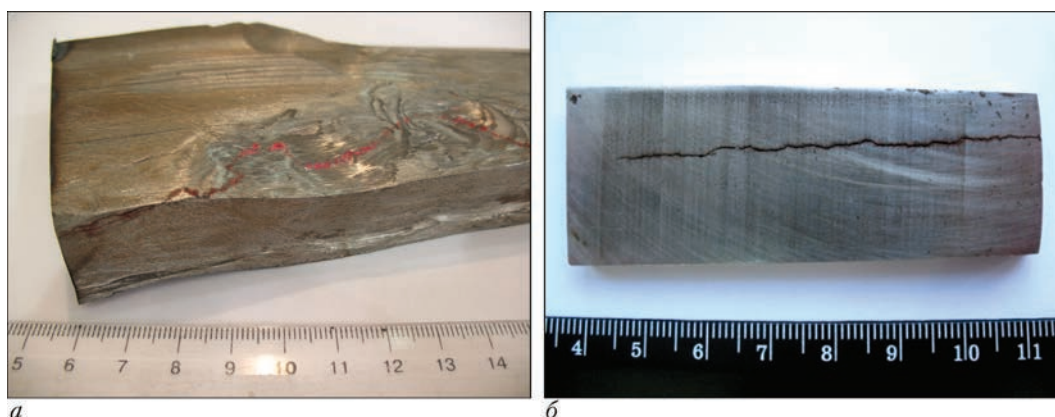


Рис. 1. Трещины в сварном соединении (капиллярный контроль): а – с внутренней стороны сварного шва; б – на поверхности темплета

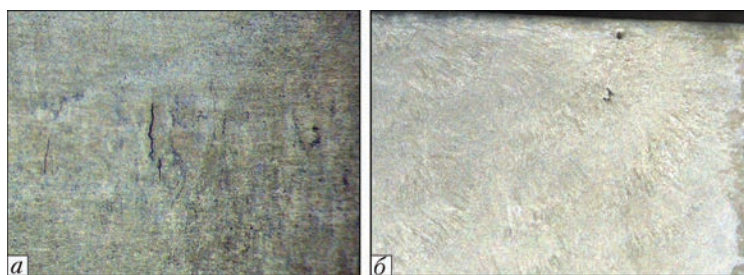


Рис. 2. Дефекты в сварном шве: а – микротрещины; б – поры толще металла и не имеющие выхода на поверхность, в большинстве случаев представляют собой поры диаметром около 1 мм и трещины длиной 1...5 мм (рис. 2) [2].

Как показывает практика, не всегда методом УЗК удается обнаружить несплошности, так как чувствительность УЗК во многом зависит от контролирующего оборудования, состояния поверхности, структуры металла и расположения несплошностей в металле относительно акустической волны.

Метод капиллярной дефектоскопии является наиболее простым в применении, но недостаток этого метода заключается в том, что он позволяет выявить уже существующие дефекты и только на поверхности конструкции. Кроме того, проведение контроля требует предварительной тщательной подготовки поверхности металла.

Методы УЗК и капиллярной дефектоскопии направлены на поиск и обнаружение уже возникшего дефекта и не позволяют определить зоны концентрации напряжений (ЗКН), обусловленных действием рабочих эксплуатационных нагрузок, и отследить динамику развития ЗКН, предшествующую зарождению дефекта.

В настоящее время в мире намечается новая стратегия НК, где центр усилий в оценке деградации материала переносится от метода реагирования на событие, которое состоялось, на прогностические действия. Одними из таких прогностических методов контроля являются магнитные методы: метод коэрцитиметрии и метод магнитной памяти металла [3]. Эти методы позволяют выявить потенциально опасные зоны – ЗКН – еще до образования и развития дефектов. Существующая методика диагностического контроля напряженного состояния металла корпуса реактора, оборудования и трубопроводов АЭС методом магнитной памяти металла является сравнительно новой, но она нашла свое применение в процессе НК оборудования и трубопроводов [4].

Анализ литературных источников [5–14] относительно причин повреждения СС №111 показывает, что за время существования этой проблемы накоплен достаточно большой опыт по разным методикам исследований: определения прочностных характеристик и пластичности металла,

установления причин появления очагов разрушения металла, определения механизмов зарождения и распространения трещин, влияния рабочих факторов на возникновение, накопление и развитие дефектообразований.

По результатам анализа можно отметить, что для более детального изучения и установления причин развития дефектообразований в металле сварного соединения приварки патрубка Ду1200 к коллектору парогенератора ПГВ-1000М целесообразны комплексные исследования с привлечением к общепринятым методикам неразрушающих магнитных методов контроля металла, а также исследований содержания водорода.

Магнитные методы контроля металла сварного соединения № 111. Контроль напряженно-деформированного состояния (НДС) металла СС № 111 методом измерения коэрцитивной силы и методом магнитной памяти металла осуществлялся во время ППР на Южно-Украинской АЭС. Ниже представлены результаты контроля НДС металла «горячего» коллектора парогенератора ЗПГ-1 на энергоблоке № 3, который проводился в 2010–2012 гг. [4].

Измерения коэрцитивной силы проводились в области 100 мм выше и ниже середины сварного шва. Результаты измерений представлены на рис. 3 в виде развертки сварного шва, где середина шва расположена на отметке 100 мм. О НДС металла можно судить по изменению цветовой гаммы развертки шва от исходного темного до «предельного» светлого цвета. Значение коэрцитивной силы изменяется от минимального для исходного отожженного металла (темные участки), до максимального, когда металл находится в состоянии предразрушения, на границе предела текучести (светлые).

Результаты показывают, что в 2010 г. в сварном шве значительные напряжения отсутствуют (рис. 3, а). В 2011 г. (рис. 3, б), наблюдается локализация напряжений в металле ниже середины сварного шва (от 0 до 130°). В 2012 г. (рис. 3, в) можно видеть значительное увеличение напряжений ниже середины шва между отметками 0 и 130°.

Результаты контроля СС № 111 горячего коллектора ЗПГ-1 методом магнитной памяти металла показаны на рис. 4 в виде магнитограммы, построенной по данным контроля в 2012 г. На магнитограмме наблюдается зона значительной концентрации напряжений металла на интервале от 240 до 1100 мм.

Кроме контроля напряженного состояния магнитными методами был выполнен контроль несплошностей в СС № 111 методом УЗК. Контроль показал наличие дефектов в металле сварного шва и околошовной зоны.

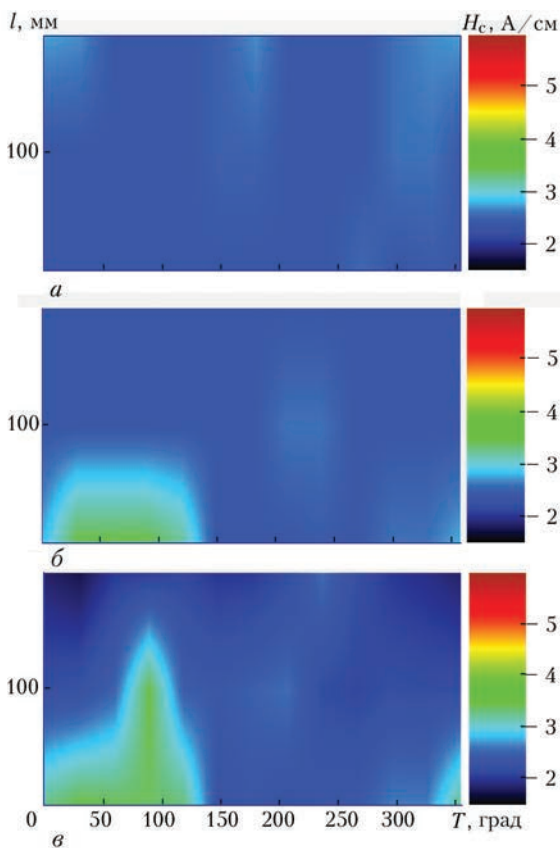


Рис. 3. Результаты контроля СС №111 коллектора парогенератора ЗПГ-1 «ГК» ППР методом коэрцитиметрии по годам: а – 2010; б – 2011; в – 2012 г.

Сравнительный анализ показывает, что результаты контроля магнитными методами коррелируют с результатами, полученными методом УЗК [15].

После определения мест локализации несплошностей магнитными методами и методом УЗК из сварного шва при ремонте в 2012 г. был вырезан темплет, который был передан для исследований в ННЦ ХФТИ.

На рис. 5 приведены результаты контроля СС №111 тремя методами: коэрцитиметрическим, магнитной памяти металла и УЗК, а также схема вырезки темплета.

Отдельно темплет также был исследован методом магнитной памяти металла.

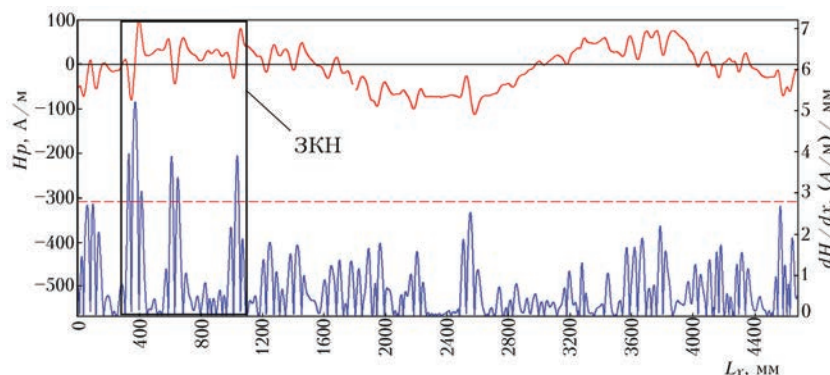


Рис. 4. Результаты контроля сварного шва № 111 методом магнитной памяти металла в 2012 г.

На рис. 6, а показан темплет и места локализации внутренних дефектов в металле, выявленные методами УЗК и радиографического контроля (РГК) – белые и черные метки соответственно. На рис. 6, б показана магнитограмма поверхности темплета, полученная методом магнитной памяти металла. Места аномалий распределения собственных магнитных полей рассеяния показаны темными участками.

Видно, что зоны концентрации напряжений (темные участки) соответствуют местам расположения дефектов.

Металлография и электронная микроскопия.

Исследования с помощью металлографических методик показали, что металл сварного соединения имеет слоистую структуру (рис. 7), присущую многопроходной электросварке металла. На поверхности образца сварные валики расположены параллельными рядами, образуя полосчатую структуру с мелкокристаллическими и столбчатыми слоями, достигающими ширины приблизительно 4 мм. В слоях с мелкокристаллической составляющей наблюдается ферритно-перлитная структура с содержанием перлита около 65 %, в столбчатой структуре – 72 % (ГОСТ 8233–82, шкала эталона № 7). Было обнаружено также, что в металле сварного шва присутствуют разного рода дефекты, такие как поры, микротрещины и неметаллические включения (рис. 7, б–д).

Проведенные измерения микротвердости по высоте сварного шва (от корня шва к внешней поверхности микротвердость измеряли в соответствии с ГОСТ 9450–76 при нагрузке индентора 20 г) показали, что значения (рис. 8) меняются периодически в соответствии с чередованием мелкозернистой и столбчатой структур, содержанием в них ферритной и перлитной составляющих.

Микротвердость металла сварного соединения изменяется от 1300 до 2000 МПа, что характерно для ферритно-перлитной стали при различном содержании в ней углерода.

Кроме выявленных трещин и пор [16] при послойной шлифовке металла темплетов были обнаружены участки со скоплением включений, которые были идентифицированы как карбид кремния SiC. Размер включений колеблется от 10 до 80 мкм. На рис. 9 можно видеть пример таких неметаллических включений.

Включения, обнаруженные вблизи корня сварного шва, располагаются вокруг трещин или в их русле. В целом, в металле шва количество и размер неметаллических включений не превышает допустимые нормы [15]. Следует от-

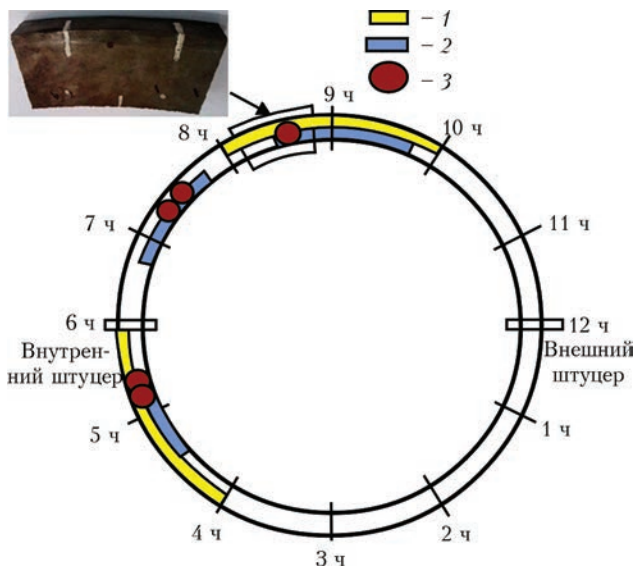


Рис. 5. Результаты контроля сварного шва № 111 методами коэрцитиметрии (1), магнитной памяти металла (2), УЗК (3) и схема вырезки темплетов

метить, что включения SiC располагаются вблизи корня шва. Были выявлены также одиночные трещины длиной до 3 мм (рис. 7, б) и зоны с наличием пор (рис. 10), диаметр которых не превышает 0,6 мм.

Поры, также как неметаллические включения и трещины, расположены вблизи корня сварного шва. Происхождение этих дефектов может быть связано с условиями сварки, в частности, с присутствием водорода и других газов, которые, выделяясь при охлаждении сварочной ванны, локально накапливаются, образуя поры и макроскопические полости. Наличие и величина подобных дефектов в металле регламентируется нормами [15].

По характеру и расположению обнаруженные в процессе исследований трещины можно отнести к дефектам, которые появились в результате длительной эксплуатации. Важным моментом в уста-

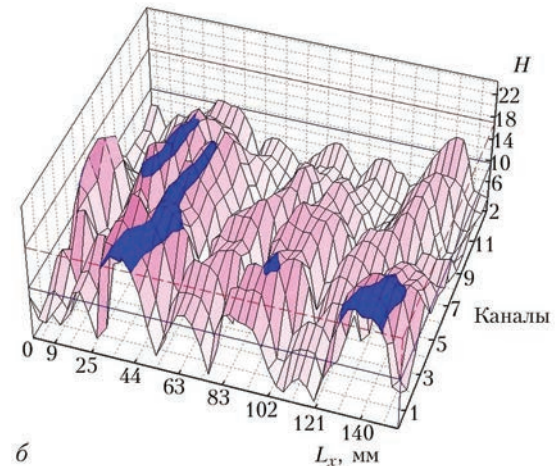


Рис. 6. Места локализации внутренних дефектов в металле темплетов, выявленные методами УЗК и РГК (белые и черные метки соответственно) (а) и аномалии распределения собственных магнитных полей рассеяния (б)

новлении причин их образования являются выявленные вблизи вершин трещин частицы карбида кремния (рис. 9). В отличие от неметаллических включений (оксиды, силикаты и др.), которые выделяются при металлургических процессах сварки, форма, размеры и расположение частиц карбида кремния свидетельствуют о том, что они были занесены в расплав сварного шва. Присутствие частиц карбида кремния в металле можно объяснить особенностями многопроходной сварки, при которой требуется зачищать валики от флю-

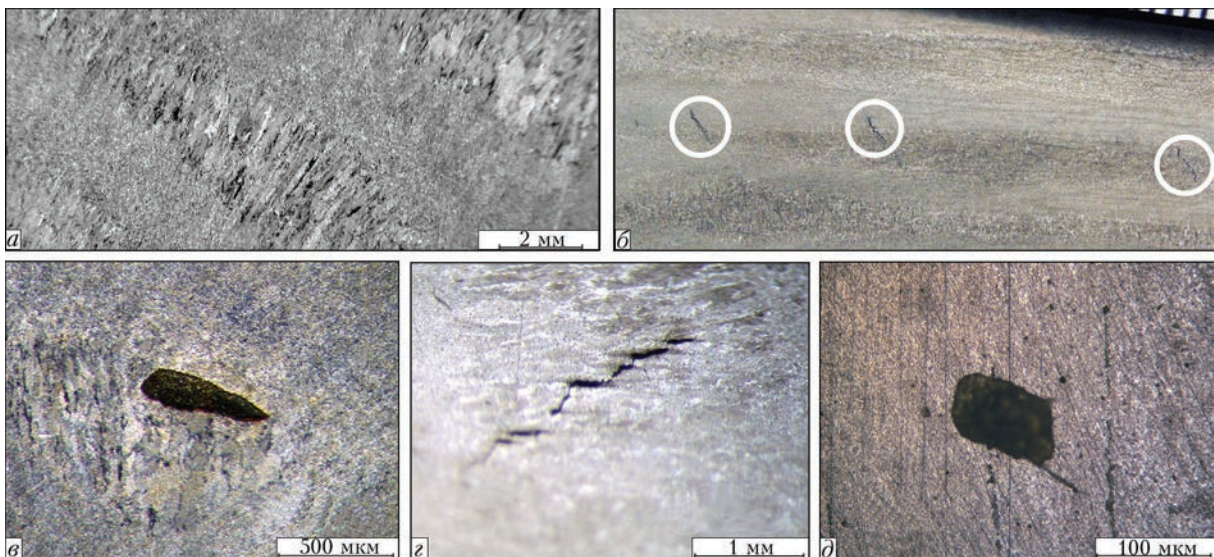


Рис. 7. Структура металла сварного шва и выявленные дефекты: а – слоистая структура металла шва; б – макроструктура с трещинами (выделены кругами); в – пора; г – трещина; д – неметаллическое включение

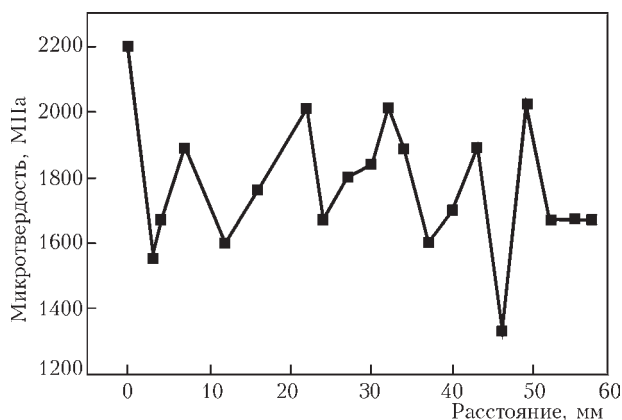
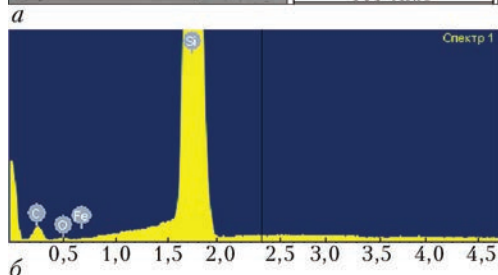
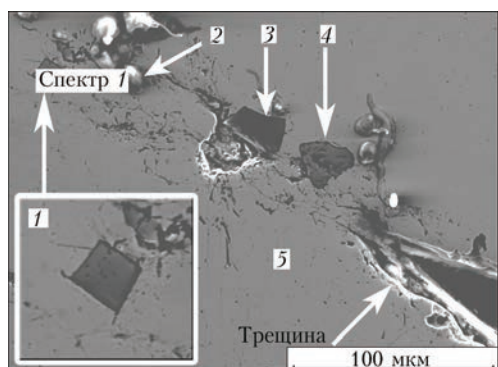


Рис. 8. Периодическое изменение микротвердости по высоте сварного соединения

са перед наложением очередных слоев. Зачистка осуществляется с помощью абразивных кругов, в состав которых входит карбид кремния. Частицы карбида кремния при износе круга попадают в изготавливаемый шов.

На начальной стадии изготовления клиновидного СС №111, когда формируется корень шва и первые валики, зачистка металла и удаление абразива из области сварки затруднены. Можно предположить, что именно поэтому в этой области наиболее часто встречаются включения частиц карбида кремния. Карбид кремния не растворяет-



Элемент	Массовый процент	Атомный процент
C	22,85	40,87
O	1,17	1,57
Si	74,54	57,01
Fe	1,44	0,55
Итого	100,00	100,00

Рис. 9. Включения и несплошности в сварном шве (а): 1 – включение карбида кремния; 2 – пора; 3 – включение карбида кремния; 4 – включение оксида железа; 5 – основной металл; спектр и химический состав включения 1 (б)

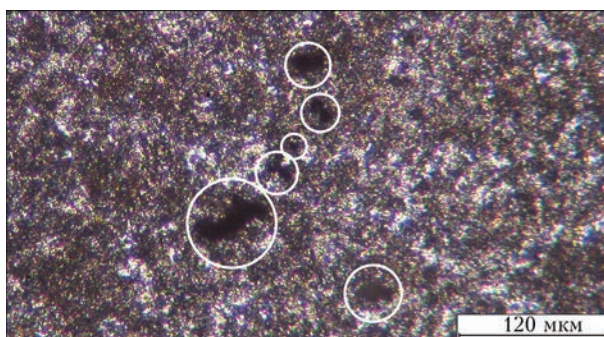
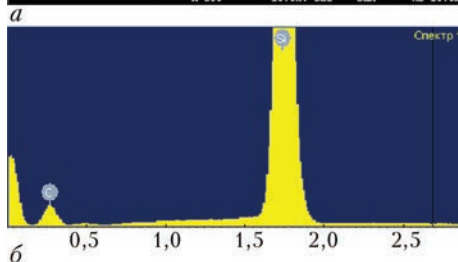
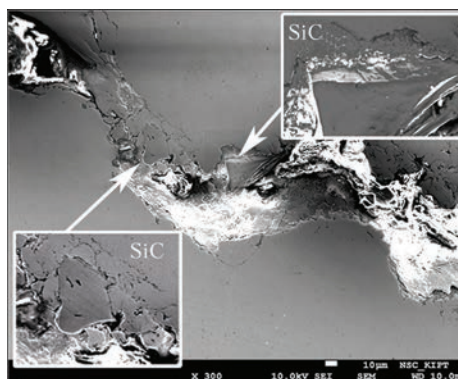


Рис. 10. Скопление пор (выделены кругами)

ся в расплаве металла и участвует в формировании макроструктуры. На рис.11 показаны частицы карбида кремния в металле.

Скопления SiC или отдельные частицы на границе сварных валиков могут создавать локальные напряжения. Коэффициент термического расширения SiC в несколько раз меньше, чем у стали – (3...4) и (16...18)·10⁻⁶, соответственно, поэтому при кристаллизации расплава под действием возникающих напряжений возможно образование микротрещин с последующим их раскрытием и подрастанием в условиях эксплуатации. Зарождению трещин могут также способствовать углы неметаллических включений (как концентраторы напряжений). Эти дефекты не выявляются методами контроля сразу после изготовления и в начальный период эксплуатации; они становятся заметны при подрастании под действием эксплуатационных факторов (пуск-останов).



Элемент	Массовый процент	Атомный процент
C	22,17	39,97
Si	77,83	60,03
Итого	100,00	100,00

Рис. 11. Включения в сварном шве: а – расположение карбида кремния в металле шва; б – спектр включения и его химический состав

Параллельное расположение трещин является явным признаком того, что их рост связан с направленными напряжениями в СС. Небольшую длину трещин, которые образовались, можно объяснить тем, что трещина распространяется хрупко через столбчатую зону сварочного валика, но затухает вязко при входе в зону с мелкокристаллической структурой. Возникает вопрос об опасности такого растрескивания для эксплуатации. Локальный характер действия включений, затухание трещин от них в пределах одного-двух слоев сварочных валиков, а также направленность трещин под углом 40...50° к оси шва позволяют предположить, что их слияние в магистральную трещину маловероятно. Это дает основание допускать эксплуатацию соединения при условии регулярного контроля.

Магнитные свойства и микроструктура металла. Образцы для исследований магнитных свойств в различных зонах СС имели размеры 4,3×3,0×1,7 мм. Образцы изготавливали распиловкой темплета на пластинки толщиной 1,7 мм на фрезерном станке с последующей вырезкой образцов электроэрозионным методом. Магнитные свойства образцов определяли с помощью магнитного гистерографа с применением импульсно-индукционной методики [17] в соответствии с ГОСТ 8.377–80 [18].

Проведенные измерения показали, что для образцов с различным содержанием столбчатой микроструктуры магнитные свойства различны. На рис. 12 показаны образцы с разной микроструктурой. В подписях к рисункам указано содержание столбчатой структуры, усредненное по толщине образцов, номера образцов и измеренные значения коэрцитивной силы.

В таблице приведены значения процентного содержания столбчатой микроструктуры A_{cp} , полученные для них результаты коэрцитивной силы H_c (А/м), остаточной магнитной индукции B_r (Тл) и максимальной магнитной проницаемости μ .

По результатам исследований можно констатировать, что имеют место существенные изменения измеренных магнитных параметров от микроструктурных особенностей образцов. В частности, для коэрцитивной силы наблюдается тенденция к увеличению H_c с увеличением содержания столбчатой микроструктуры в образцах. Так, в наплавленном металле с наибольшим содержанием мелкокристаллической структуры (образец № 1) имеют место наименьшие значения H_c , тогда как в образце с преимущественно столбчатой структурой (образец № 3) наблюдали в два раза большее значение H_c .

Указанные особенности можно объяснить тем, что H_c является фактором, который зависит от микроструктуры и текстуры материала, а также его напряженного состояния. Более высокие значения коэрцитивной силы для столбчатой структуры по сравнению с мелкокристаллической можно объяснить неоднородным распределением продуктов распада аустенита. Это приводит к напряженному состоянию столбчатых слоев. Подтверждением этого являются результаты ранее проведенных исследований микроструктуры и микротвердости многослойного СС № 111 [19], где было отмечено, что в слоях с мелкокристаллической структурой трещины развиваются вязко, а в столбчатой структуре – хрупко, что является признаком напряженного состояния металла в столбчатых слоях.

Водород в сварном соединении. Концентрацию водорода в металле сварного соединения приварки патрубка к коллектору парогенератора определяли путем термоактивированной де-

Процентное содержание столбчатой микроструктуры и магнитные параметры образцов

Номер	A_{cp} , %	H_c , А/м	B_r , Тл	μ
1	0	430	0,103	150
2	68	524	0,074	89
3	92	831	0,096	106

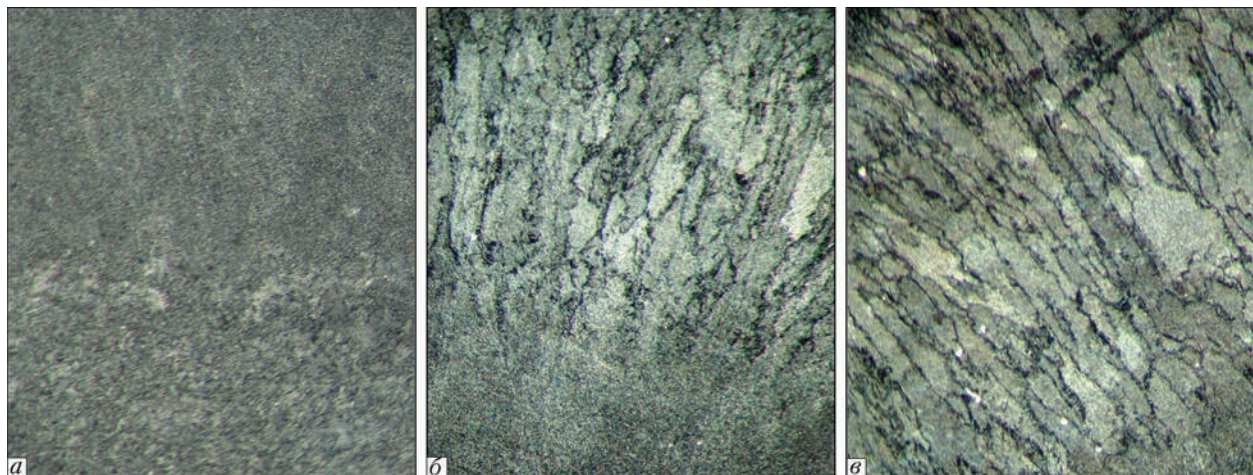


Рис. 12. Микроструктура и магнитные свойства образцов: а – образец № 1, структура кристаллическая, $H_c = 430$ А/м; б – образец № 2, структура столбчатая 68 %, $H_c = 524$ А/м; в – образец № 3, структура столбчатая 92 %, $H_c = 831$ А/м

сорбции [20, 21]. При этом применяли динамический метод анализа содержания газа. Метод основан на измерении давления в вакуумной камере, которое прямо пропорционально скорости десорбции газов из прогреваемого образца. Измерения выполнены с помощью масспектрометра MX 7304. В этих экспериментах отжиг образцов в интервале температур 300...1500 К вели со скоростью 6 град·с⁻¹. Нагрев образцов осуществляли резистивным методом. Давление остаточных газов в камере составляло около 5·10⁻⁵ Па. Количественные характеристики выделения водорода из металла образцов получали при формировании навесок массой приблизительно 0,2 г и размером 1×1×72 мм. Полученные температурные зависимости скорости десорбции показаны на рис.13. Содержание водорода в образцах определяли путем интегрирования этих кривых.

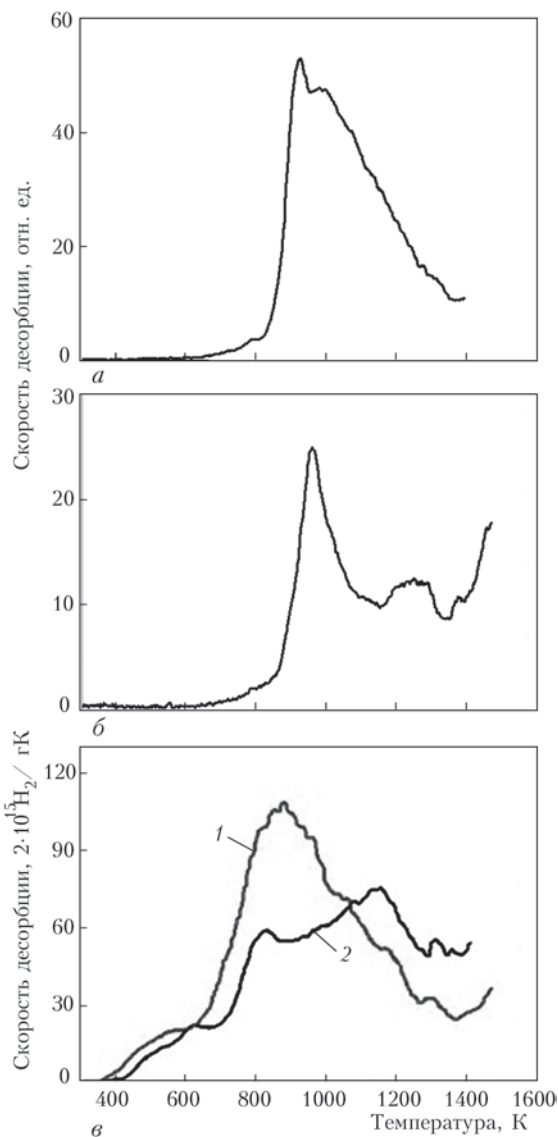


Рис. 13. Распределение водорода в сварном шве: а – в зоне корня шва; б – на расстоянии 10 мм от поверхности; в – мелкокристаллическая (1) и столбчатая (2) микроструктуры

Результаты исследований свидетельствуют о том, что после длительной эксплуатации парогенератора водород накапливался в области корня сварного шва, которая граничит с рабочей средой второго контура. Концентрация водорода в этой зоне достигает 36 см³/100 г и постепенно снижается до 11 см³/100 г на глубине около 10 мм от поверхности.

Повышенное количество водорода у корня сварного шва можно объяснить тем, что на поверхности металла проходят процессы коррозии. Вследствие взаимодействия металла с теплоносителем под влиянием рабочих факторов водород выделяется и диффундирует в металл. Можно также предположить, что насыщение металла водородом до указанных концентраций частично произошло за счет сварочного процесса.

Полученные результаты также свидетельствуют, что количество водорода в глубине сварного соединения меняется в зависимости от структуры металла и составляет около 8 см³/100 г для мелкокристаллической и 5 см³/100 г для столбчатой. Температура интенсивного выхода водорода из мелкокристаллической структуры составляет ~ 850 К; для столбчатой – 800 и 1150 К.

Выводы

Проведены комплексные исследования состояния металла сварного шва №111 в соединении коллектора с парогенератором ПГВ-100 после длительной эксплуатации на энергоблоке № 3 Южно-Украинской АЭС, включающие методы магнитного контроля, металлографии, растровой электронной микроскопии и микрорентгеновского анализа, а также метод водородного анализа путем термодесорбционной масспектрометрии.

В результате проведенных исследований было установлено, что металл сварного шва № 111 соответствует низколегированной ферритно-перлитной стали, имеет полосчатую структуру с чередованием столбчатых и мелкокристаллических слоев, что характерно для многопроходной электросварки. Показано, что микротвердость металла изменяется периодически в соответствии с микроструктурой шва, при этом значения микротвердости лежат в пределах требований технических условий к материалу сварного шва.

Методами неразрушающего контроля были обнаружены несплошности в сварном шве, превышающие нормативные требования. Методами металлографии и электронной микроскопии несплошности были идентифицированы как поры размерами до 1 мм и трещины длиной до 5 мм. Было установлено, что трещины развиваются от частиц карбида кремния, которые были занесены во время изготовления СС. Исследование строения дефектов показало, что их величина и

локальное расположение в металле допускает дальнейшую эксплуатацию сварного соединения при условиях регулярного контроля.

Напряженно-деформированное состояние в СС № 111, установленное с помощью коэрцитиметрии и магнитной памяти металла, коррелирует с данными ультразвукового контроля и соответствует результатам металлографических исследований.

Авторы благодарны за помощь в работе сотрудникам Южно-Украинской АЭС А. В. Бажукову, А. М. Палию и П. Е. Мельнику

1. Комплексний підхід до визначення ресурсу зварного з'єднання приварки патрубку до колектору парогенератора ПГВ-1000М реактора ВВЕР-1000 / Л. С. Ожигів, А. С. Митрофанов, Є. О. Крайнюк [та ін.] // 36. наукових статей за результатами, отриманими в 2013–2015 рр. Цільова комплексна програма НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин». – К.: Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, 2015. – С. 314–327.
2. Внутренние несплошности в швах сварных соединений приварки коллекторов к патрубкам корпусов парогенераторов на энергоблоках ВВЭР-1000 / В. Н. Воеводин, Л. С. Ожигів, А. С. Митрофанов [и др.] // Тяжелое машиностроение. – 2014. – № 11–12. – С. 8–13.
3. Дубов А. А. Метод магнитной памяти металла и приборы контроля. Учебное пособие / А. А. Дубов, Ал. А. Дубов, С. М. Колокольников. – М.: ЗАО «Тиссо», 2003. – 320 с.
4. Каталог данных неразрушающего контроля напряженно-деформированного состояния корпусов реакторов типа ВВЭР-1000 и трубопроводов АЭС / И. М. Неклюдов, Л. С. Ожигів [и др.] // Свідчення про реєстрацію авторського права на твір №41953 від 30.01.2012 р.
5. Перераспределение напряжений в узле соединения коллектора с патрубком парогенератора ПГВ-1000 при его нагружении после термообработки // В. В. Харченко, Г. В. Степанов, В. И. Кравченко [и др.] // Проблемы прочности. – 2009. – № 3. – С. 25–31.
6. Махненко В. И. Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций / В. И. Махненко. – К.: Наукова думка, 2006. – 620 с.
7. Влияние воды высоких параметров на склонность стали 10ГН2МФА к замедленному деформационному коррозионному растрескиванию / Ю. Г. Драгунов, А. С. Зубченко, О. Ю. Петров [и др.] // Машиностроение и инженерное образование. – 2007. – № 4. – С. 35–41.
8. Эрозионно-коррозионный износ оборудования атомных электростанций / В. И. Бараненко, Б. И. Нигматулин, Т. Е. Щедеркина [и др.] // Атомная техника за рубежом. – 1995. – № 8. – С. 9–13.
9. Про причини ушкодження зварних з'єднань № 111 парогенераторів ПГВ-1000 / А. С. Митрофанов, Л. С. Ожигів, Є. О. Крайнюк [та ін.] // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2009. – Т.1 4, № 4. – С. 79–83.

10. Повышение надежности эксплуатации коллекторов парогенераторов ПГВ-1000–1000М / Ю.Г. Драгунов, О.Ю. Петрова, С.Л. Лякишев [и др.] // Атомная энергия. – 2008. – 104, № 1. – С. 9–13.
11. Лобанов Л. М. Оценка сварных соединений конструкций магнитным (коэрцитиметрическим) методом для прогнозирования индивидуального остаточного ресурса / Л. М. Лобанов, А. Ю. Бондаренко, Ю. К. Бондаренко // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2004. – № 1. – С. 3–8.
12. Махненко В. И. Трещины стресс-коррозии в зоне сварного соединения № 111 парогенераторов ПГВ-1000М энергоблоков ВВЭР-1000 (проект 1.1) / В. И. Махненко, Е. А. Великоиваненко // Проблемы ресурсу і безпеки експлуатації конструкції, споруд та машин. – К.: ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України, 2006. – С. 2–10.
13. Чирков А. Ю. Смешанная схема метода конечных элементов для решения краевых задач теории упругости и малых упругопластических деформаций / А. Ю. Чирков. – К.: Изд-во Ин-та проблем прочности, 2003. – 250 с.
14. Неклюдов И. М. Эксплуатационные повреждения теплообменных трубок и сварных соединений в парогенераторах энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000 / И. М. Неклюдов, В. М. Ажажа, Л. С. Ожигів [и др.] // Проблемы прочности. – 2008. – № 2 (392). – С. 105–111.
15. Заготовки из стали марки 10ГН2МФА, 10ГН2МФА-ВД, 10ГН2МФА-Ш для оборудования АЭС. ТУ 0893-014-00212179–2004 (взамен ТУ 108.766–86). – [Введен. 2005-02-01]. – М.: Госстандарт России ВНИИстандарт, 2005. – 28 с.
16. Идентификация несплошностей в металле сварного соединения корпуса парогенератора с коллектором на энергоблоках ВВЭР-1000 / В. Н. Воеводин, Л. С. Ожигів, А. С. Митрофанов [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. – 2014. – № 4 (92). – С. 82–87.
17. Чечерников В. И. Магнитные измерения / В. И. Чечерников. – М.: Изд-во МГУ, 1969. – 387 с.
18. Методика выполнения измерений при определении статических магнитных характеристик: ГОСТ 8.377–80. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1986. – 21 с.
19. Особенности поврежденных сварных соединений № 111 в парогенераторах энергоблоков ВВЭР-1000 / И. М. Неклюдов, Л. С. Ожигів, А. С. Митрофанов [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 2013. – № 2. – С. 18–25.
20. Неклюдов И. М. Сочетание метода ядерных реакций, термодесорбционной спектроскопии и двухлучкового облучения при исследовании поведения гелия и водорода в конструкционных материалах / И. М. Неклюдов, Г. Д. Толстолуцкая, В. В. Ружицкий [и др.] // Тр. XIV Международного совещания «Радиационная физика твердого тела» г. Севастополь, 5–10 июля 2004 г. – М.: ГНУ «НИИ ПМТ», 2004. – С. 592–596.
21. Неклюдов И. М. Гелий и водород в конструкционных материалах / И. М. Неклюдов, Г. Д. Толстолуцкая // ВАНТ. – 2003. – № 3. – С. 3–14.

Coercimetry and magnetic memory techniques were used to perform diagnostic testing of stress-strain state of metal in the assemblies connecting collectors to housing of PVG-100M steam generator after long-term operation in power unit of South-Ukrainian NPP. Results of comprehensive studies of metal state were analyzed. Microcracks, pores and nonmetallic inclusions were detected and identified, and their composition was determined. Change of metal microhardness by weld height was studied. It is shown that in weld root zone the amount of accumulated hydrogen is three times higher than in other sections of welded joint metal. 21 References, 1 Table, 13 Figures.

Keywords: steam generator, welded joint, service defects, metal microstructure, thermodesorption, stress-strain state, magnetic diagnostic techniques

*Поступила в редакцию
07.03.2016*

ДІАГНОСТУВАННЯ СХИЛЬНОСТІ ТРУБНОЇ СТАЛІ ДО ДЕГРАДАЦІЇ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВНАСЛІДОК ТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Г. М. НИКИФОРЧИН, О. Т. ЦИРУЛЬНИК, О. І. ЗВІРКО, В. А. ВОЛОШИН

Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України. 79053, м. Львів-53, вул. Наукова, 5. E-mail: termomech@iapmm.lviv.ua

Розроблено прискорений метод деградації механічних властивостей сталей магістральних трубопроводів у лабораторних умовах, який дозволяє діагностувати схильність сталей та їх зварних з'єднань до деградації внаслідок тривалої експлуатації, що дає можливість прогнозувати зміну роботоздатності трубопроводів в процесі їх експлуатації. Проведено порівняльні дослідження механічних та корозійно-механічних властивостей лабораторно та експлуатаційно деградованих сталей. За базу лабораторну методику взято відомий метод імітації деформаційного старіння металів за ГОСТ 7268–82. Апробовано новий метод моделювання експлуатаційної деградації трубних сталей за кліматичних температурних умов, який полягає у штучному деформаційному старінні попередньо електролітично наводненого металу і поєднує різні механізми деградації: деформаційного зміцнення, деформаційного старіння та розвитку розсіяної пошкодженості. Бібліогр. 9, рис. 4.

Ключові слова: експлуатаційна деградація, сталі магістральних трубопроводів, електролітичне наводнення, ударна в'язкість, тріщиностійкість, корозійне розтріскування

На території України експлуатується велика мережа магістральних трубопроводів (МТ) і більш 50 % з них працює після завершення амортизаційного терміну служби. Це призводить до виникнення експлуатаційних відмов, а інколи – до аварій, які обумовлюють не тільки значні матеріальні збитки, але і порушення екологічної безпеки навколишнього середовища. Аналіз причин аварій МТ дозволив встановити, що у багатьох випадках відмови пов'язані з розривами по металу, при цьому більше 50 % конструкцій руйнуються внаслідок корозійних пошкоджень, 37 % аварій викликані незадовільною якістю металу через недостатні пластичність і ударну в'язкість [1]. Вважають, що це спричиняє деформаційне старіння матеріалу трубопроводу впродовж його тривалої експлуатації. З огляду на це експлуатаційну деградацію (ЕД) трубних сталей імітують у лабораторних умовах штучним деформаційним старінням (ШДС) згідно з ГОСТ 7268–82 [2]. Водночас відомо також про особливу вразливість деформованого металу до дії корозійно-водневого чинника. Таким чином, проблема стабільності експлуатаційних властивостей сталей МТ, що зазнають в процесі виготовлення труб суттєвого попереднього пластичного деформування (ППД), особливо гостра і вирішення завдань оцінювання та підвищення роботоздатності такого обладнання часто неможливе без урахування дії цього чинника.

З іншого боку, встановлено, що метал експлуатованих конструкцій містить підвищену концентрацію

розчиненого водню порівняно із неексплуатованим [3–6]. Показано також, що за більшого вмісту водню у сталях спостерігається і сильніша деградація їх властивостей. Звідси запропоновано розглядати ЕД металу як суперпозицію сумісної дії експлуатаційних навантажень і абсорбованого ним водню.

Мета роботи: розробити лабораторний експрес-метод діагностування схильності трубних сталей до експлуатаційної деградації за кліматичних температурних умов, який поєднує різні механізми деградації: деформаційного зміцнення, старіння та розвитку розсіяної пошкодженості, пов'язаної із специфічною дією впродовж активного навантаження абсорбованого металом водню.

Розвиток та верифікація методик лабораторного моделювання експлуатаційної деградації трубних сталей, що спирається на ШДС попередньо наводненого металу. Дослідження проводили на сталі X52 труб МТ.

У роботі модернізували метод ШДС, що відповідає ГОСТ 52079–2003, введенням операції попереднього електролітичного наводнювання (ПЕН), поверхневим електролітичним мідненням і зменшенням наступного ППД до такого рівня деформації, котра вичерпує межу плинності матеріалу ($\approx 5\%$).

Випробування проводили на двох партіях заготовок. Заготовки першої партії попередньо пластично деформували: навантажували розтягом до різного рівня деформації ε (2,5...15 %) і піддавали відпуску при 250 °C впродовж 1 год – метод ШДС згід-

но ГОСТ 7268–82. Заготовки другої партії – метод ПЕН-ШДС – наводнювали у лужному електроліті (0,1 н р-н NaOH) за сталого струму (50 мА/см²) при температурі 70 °С впродовж 100 год, що забезпечувало насичення воднем усього об'єму зразка. Відновлення характеристик пластичності сталі після десорбції водню із заготовок за витримки при 150 °С впродовж доби вказує на те, що у металі за такого рівня струму у процесі ПЕН не розвивається викликана воднем незворотна пошкодженість. Наступне міднення заготовок із кислого електроліту, що забезпечувало безпористе мідне покриття товщиною до 30 мкм, гальмувало десорбцію водню впродовж навантаження розтягом до 4 % залишкової деформації і ШДС. Однак перед виготовленням зразків мідне покриття зішліфовували із заготовок і витримували їх при 150 °С впродовж доби для десорбції водню.

Із заготовок виготовляли циліндричні зразки для визначення стандартних механічних властивостей (межі плинності $\sigma_{0,2}$, межі міцності σ_b , відносного звуження ψ і відносного видовження δ) та зразки Шарпі для визначення ударної в'язкості KCV.

Для верифікації запропонованого методу порівнювали експериментально визначені механічні характеристики сталі X52 у вихідному стані, після ШДС згідно ГОСТ 7268–82 та після ШДС запропонованим методом.

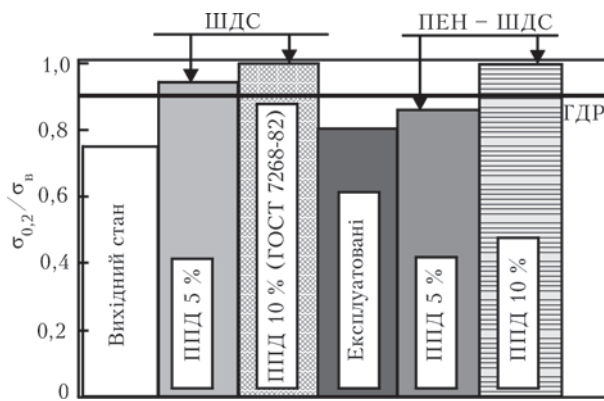


Рис. 1. Порівняння значень відношення $\sigma_{0,2}/\sigma_b$ сталі X52 після лабораторних методів деградації із максимальною його зміною внаслідок тривалої експлуатації трубних сталей

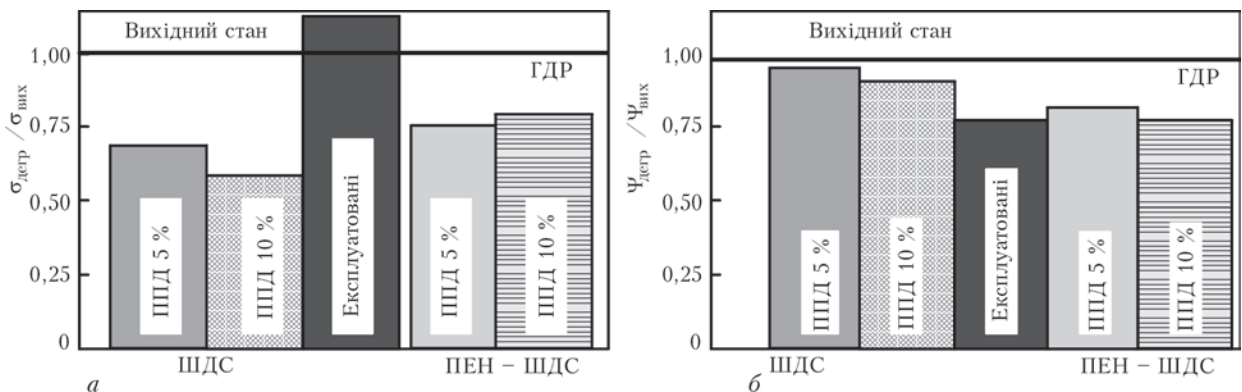


Рис. 2. Порівняння відносної зміни δ (а) і ψ (б) сталі X52 після лабораторних методів деградації із максимальною їх зміною внаслідок тривалої експлуатації трубних сталей (ГДР – гранично допустимий рівень)

ШДС згідно ГОСТ 7268–82 надто інтенсифікує деформаційне зміцнення, що спричиняє перевищення гранично допустимого рівня відношення $\sigma_{0,2}/\sigma_b$ (рис. 1) і різке падіння відносного видовження (рис. 2), чого не спостерігається при дослідженні ЕД металу [3–7]. Водночас ШДС не справляє істотного впливу на ψ .

Подібні результати отримано при дослідженні впливу такої обробки на механічні властивості трубної сталі 17ГС у двох вихідних станах – після контрольованого вальцювання та після нормалізації, а також трубних сталей контрольованого вальцювання 10Г2БТ, X70, 10Г2Т і 13ГС [8, 9].

Ефект ШДС на ударну в'язкість слабший порівняно із впливом тривалої експлуатації (рис. 3).

Менший рівень ППД у запропонованому методі ПЕН–ШДС зумовлює очікувано суттєво меншу зміну δ і $\sigma_{0,2}/\sigma_b$ порівняно із ШДС. Однак при цьому отримано значно сильніше зниження іншої характеристики пластичності – ψ , а особливо KCV.

Тобто за меншого деформаційного зміцнення у наводненому металі паралельно протікав інший процес його окрихчення. Очевидно, розвиток саме розсіяної пошкодженості в процесі ШДС наводненого металу, подібно як і за тривалої експлуатації, зумовлює і співмірні зміни механічних властивостей сталі.

Отримані результати за зміною механічних властивостей сталі вказують на те, що ШДС ненаводненого металу, особливо згідно ГОСТ 52079–2003, не узгоджуються із закономірностями впливу експлуатаційної деградації:

- спричиняє ріст відношення $\sigma_{0,2}/\sigma_b$ вище гранично допустимого;
- не справляє істотного впливу на відносне звуження;
- вплив на ударну в'язкість і тріщинотійкість істотно менший, ніж в процесі експлуатації;
- спричиняє занадто сильне падіння відносного видовження, а за ГОСТ 52079–

2003 методики – нижче гранично допустимого рівня.

Отже методика ШДС конструкційних сталей згідно ГОСТ 52079–2003 не забезпечує тих змін механічних властивостей, що спостерігається за реальних умов експлуатації, тому її використання для імітації експлуатаційної деградації трубних сталей у лабораторних умовах обмежена.

Водночас при застосуванні деформаційного старіння наводненого металу отримано результати, близькі до експлуатаційних:

- не спричиняє такого різкого зростання відношення $\sigma_{0,2}/\sigma_B$, якщо ППД $\leq 5\%$;
- вплив на відносне звуження, ударну в'язкість і тріщиностійкість співмірний з впливом експлуатації;
- спричиняє занадто сильне падіння відносно-го видовження, однак менше, ніж за використання гостованої методики і не нижче гранично допустимого рівня.

Отже, ШДС наводненого металу реальніше відтворює сукупність всіх фізичних процесів експлуатаційної деградації металу порівняно із ШДС ненаводненого металу. Насамперед це пов'язано із специфічною дією впродовж активного навантаження абсорбованого металом водню, який окрім інтенсифікації деформаційного старіння (першої фази експлуатаційної деградації – зменшення відносного звуження і видовження, ударної в'язкості і тріщиностійкості, збільшення відношення $\sigma_{0,2}/\sigma_B$), ініціює також і розвиток розсіяної пошкоженості (другої фази експлуатаційної деградації – збільшення відносного видовження, зменшення відношення $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ і ще сильнішого зниження ударної в'язкості).

Порівняльний аналіз впливу лабораторних методів ШДС і експлуатаційної деградації сталі X52 на її корозійно-механічні властивості. Із заготовок виготовляли також зразки для визначення наступних корозійно-механічних характеристик:

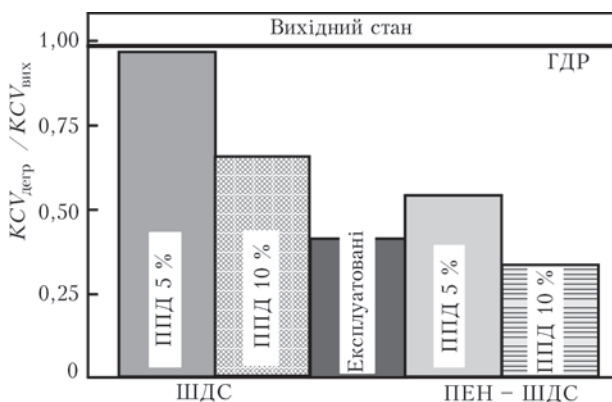


Рис. 3. Порівняння відносної зміни KCV сталі X52 після лабораторних методів деградації із максимальною їх зміною внаслідок тривалої експлуатації трубних сталей

- Ψ_{SCC} – відносного звуження випробуваннями у корозивному середовищі за потенціалу корозії;
- J_{SCC} – порогового рівня тріщиностійкості при випробуваннях у корозивному середовищі за потенціалу корозії.

З огляду на те, що із закономірностями впливу експлуатаційної деградації найкраще узгоджуються зміни механічних властивостей сталі внаслідок ШДС наводненого металу за використання ППД 5%, в подальшому досліджували вплив саме цих умов лабораторної деградації на її корозійно-механічні властивості і порівнювали їх із впливом гостованої методики, а також із впливом експлуатації.

Корозійно-механічні характеристики сталі визначали випробуваннями у модельному розчині водного конденсату за потенціалу корозії та за поміркованого наводнювання (0,1...0,2 мА/см²).

У вихідному стані високопластична трубна сталь характеризується високим опором до корозійного розтріскування, оскільки відносне звуження гладких зразків випробуваннями у корозивному середовищі при потенціалі корозії практично не змінюється (рис. 4, а).

Після ШДС згідно ГОСТ 52079–2003 відносне звуження сталі випробуваннями у корозивному середовищі зменшується майже на 20%, тобто вона втрачає імунітет до цього виду корозійно-механічного руйнування. Проте експлуатованій сталі властивий набагато менший опір до корозійного розтріскування, у корозивному середовищі її відносне звуження зменшується майже на 40%. Очевидно така різниця зумовлена тим, що гостована методика зумовлює деформаційне зміцнення і вичерпує в основному рівномірну деформацію, що і проявляється у незначній зміні відносного звуження (див. рис. 2), яке визначається мірою локалізації деформації у «шийці» при зародженні та розвитку пошкодження у об'ємі металу, на фоні суттєвого зменшення відносного видовження, на яке мало впливає локальна деформація у шийці. Незважаючи на те, що корозійно-механічне руйнування поширюється з поверхні, опір корозійному розтріскуванню також визначається здатністю корозивного середовища локалізувати деформацію, яка ініціює зародження дефекту. Тому ШДС згідно ГОСТ 52079–2003 порівняно із тривалою експлуатацією слабше впливає на опір сталі корозійному розтріскуванню.

ШДС наводненого металу, не впливаючи на рівномірну деформацію, вичерпує його пластичність саме за умов локалізації, що різко знижує і його опір корозійному розтріскуванню.

Ці результати можуть бути підтвердженням гіпотези про розвиток (поряд із деформаційним

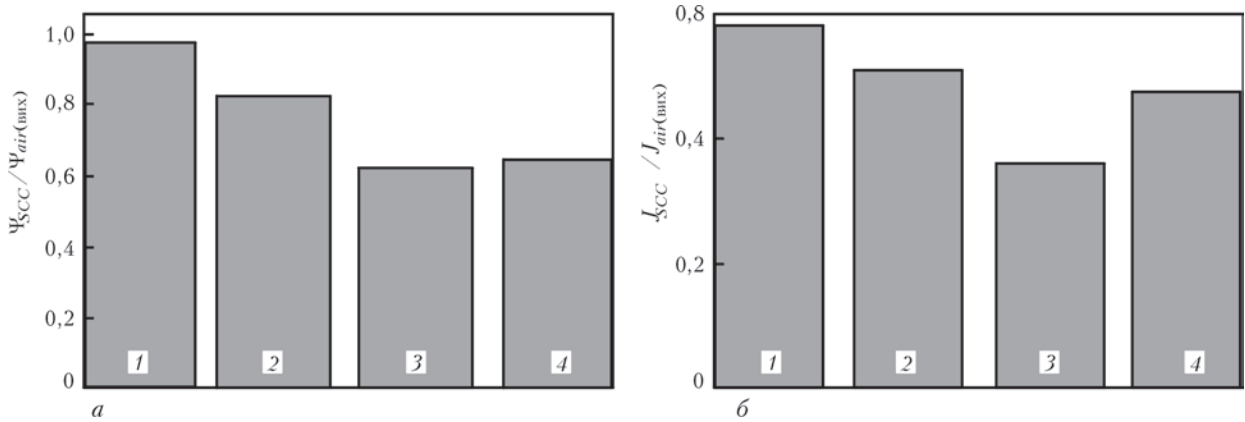


Рис. 4. Порівняння відносної зміни опору корозійному розтріскуванню (а) та корозійно-статичної тріщиностійкості (б) сталі X52 за потенціалу корозії після лабораторних методів деградації із їх відносною зміною внаслідок тривалої експлуатації: 1 – вихідний стан; 2 – за ГОСТ 7268–82; 3 – експлуатаційна деградація; 4 – за запропонованою методикою

старінням), об'ємної пошкодженості (дефектності) металу внаслідок його експлуатаційної деградації. Саме наявність дефектів у експлуатованому металі обумовлює таку різницю у деформівній поведінці експлуатованої і неексплуатованої сталі. Відповідно і краща узгодженість результатів впливу ШДС наводненого металу та експлуатації на опір корозійному розтріскуванню сталі вказують на розвиток пошкодженості в процесі деформування під впливом абсорбованого водню. Очевидно цього не відбувається за використання гостованої методики, що вказує на перевагу запропонованої методики для імітації експлуатаційної деградації трубних сталей у лабораторних умовах.

Випроби зразків з тріщиною засвідчили, що корозійно-статична тріщиностійкість трубної сталі навіть у вихідному стані є дуже низькою (рис. 4, б). Таким чином, високий опір сталі корозійному розтріскуванню визначається високим її опором зародженню корозійної тріщини. За наявності попередньо вирощеної втомної тріщини опір сталі корозійному розтріскуванню, тобто корозійно-статична тріщиностійкість, різко падає.

Після обох лабораторних методів ШДС корозійно-статична тріщиностійкість сталі дещо знижується. Однак їх вплив за таких випробувань менший, ніж за випробувань гладких зразків, оскільки наявність наперед вирощеної втомної тріщини усуває стадію зародження корозійної тріщини, що також нівелює вплив пошкодженості внаслідок ШДС наводненого металу і, тим самим, обумовлює співмірний ефект обох лабораторних методів. А зниження корозійно-статичної тріщиностійкості сталі внаслідок лабораторних методів деформаційного старіння відображає тільки ефект її зміцнення.

Водночас тривала експлуатація сталі спричиняє суттєве падіння її корозійно-статичної тріщиностійкості навіть у порівнянні із випробуваннями зразків після лабораторних методів деформаційного

старіння. Це зумовлено, очевидно, не тільки зміцненням внаслідок осадження атомів вуглецю і азоту на дислокаціях, а й іншими змінами у тонкій структурі, що протікають впродовж тривалої експлуатації за дії експлуатаційних чинників.

Висновки

Методика штучного деформаційного старіння сталі X52 за ГОСТ 7268–82 спричиняє сильний ріст відношення $\sigma_{0,2}/\sigma_B$, вище гранично допустимого за ГОСТ 52079–2003 рівня, а також незначне окрихчення металу, що проявляється неістотним зниженням відносного звуження, ударної в'язкості та характеристик корозійно-механічного руйнування. Це вказує на певні обмеження її застосування з огляду на занадто сильно виражене деформаційне зміцнення сталі, чого не досягається за реальних умов експлуатації трубних сталей.

Запропоновано новий експрес-метод моделювання експлуатаційної деградації трубних сталей за кліматичних температурних умов, який полягає у штучному деформаційному старінні попередньо електролітично наводненого металу і поєднує різні механізми деградації (деформаційного зміцнення, старіння та розвитку розсіяної пошкодженості). Метод дозволяє діагностувати схильність трубної сталі до експлуатаційної деградації її механічних характеристик та прогнозувати негативний вплив тривалої експлуатації на роботоздатність трубопроводу.

Запропонований метод моделювання експлуатаційної деградації трубних сталей викликає за менших рівнів попереднього пластичного деформування і, відповідно, незначного зростання відношення $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ лабораторно деградованої сталі співмірне зниження характеристик пластичності, подібно до випробувань експлуатованих сталей. Також вона спричиняє різке падіння ударної в'язкості, тріщиностійкості і опору корозійному роз-

тріскуванню, подібно до результатів випробувань експлуатованих сталей.

Переваги запропонованого методу моделювання експлуатаційної деградації трубних сталей пов'язані із специфічною дією впродовж активного навантаження абсорбованого металом водню, який окрім інтенсифікації деформаційного старіння (першої фази експлуатаційної деградації – зменшення відносного звуження і видовження, ударної в'язкості, статичної і корозійно-статичної тріщиностійкості, збільшення відношення $\sigma_{0,2}/\sigma_B$) ініціює також і розвиток розсіяної пошкодженості (другої фази експлуатаційної деградації – збільшення відносного видовження, зменшення відношення $\sigma_{0,2}/\sigma_B$, опору корозійному розтріскуванню і ще сильнішого зниження ударної в'язкості, статичної і корозійно-статичної тріщиностійкості).

1. Иванцов О. М. Надежность магистральных трубопроводов / О. М. Иванцов, В. И. Харитонов. – М.: Недра. – 1978.
2. Сталь. Метод определения склонности к механическому старению по испытанию на ударный изгиб: ГОСТ 7268-82. – М.: Издательство стандартов, 2002. – 4 с.

An accelerated method of degradation of mechanical properties of main pipeline steels under laboratory conditions was developed, which allows diagnosing the susceptibility of steels and their welded joints to degradation as a result of long-term service that enables prediction of the change of pipeline serviceability during their operation. Comparative studies of mechanical and corrosion-mechanical properties of steels, degraded in the laboratory and in operation, were performed. Well-known method of simulation of strain ageing of metals to GOST 7268-82 was taken as the basic laboratory procedure. A new method of modeling operational degradation of pipe steels under climatic temperature conditions was tried out that consists in artificial strain ageing of preliminarily electrolytically hydrogenated metal and combines different degradation mechanisms, strain hardening, strain ageing and development of scattered damage. 9 References, 4 Figures.

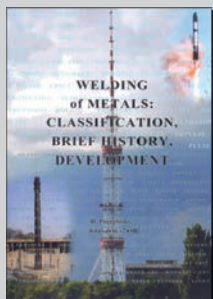
Key words: operational degradation, steels of main pipelines, electrolytic hydrogenation, impact toughness, crack resistance, corrosion cracking

Надійшла до редакції
09.06.2016

NEW BOOK

Pogrebisky D. (2016) Welding of Metals: Classification, Brief History, Development, 380 pp., 250 pictures, a dozen of tables, 205 x 290 mm, hard cover, Jerusalem, Israel. The book price is \$175.

In June, 2016 the former staff member of Paton Welding Institute published in Jerusalem a new book «Welding of Metals: Classification, Brief History, Development». It gives a lot of information about metal welding processes, including ones not listed in American and European normative documents which the author tries to match to each other. For the purpose of international harmonization, a preliminary attempt was made to provide a unified classification of about 300 welding methods based on the abbreviations that are similar to ones adopted in the American Welding Society.



At the same time the book author tried to create the impartial review of historical metal welding developments against a background of general sciences evolution and progress of adjacent processes. Some comparative, economic and other considerations are given too together with a rich illustrative material and large number of references.

The book may be useful for different welding specialists, industrial engineers, designers of precision metal structures and various electro-mechanical devices as well as for students of relevant specialties.

Orders for book please send to:
POB 31445, Jerusalem 91313, Israel
www.actualweld.com

СПЕЦИФИКА ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ТРЕЩИНОЙ УСТАЛОСТНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ ПРИ ВИХРЕТОКОВОМ КОНТРОЛЕ

А. Я. ТЕТЕРКО, В. И. ГУТНИК

Физ.-мех. ин-т им. Г. В. Карпенко НАН Украины. 79060, г. Львов, ул. Научная, 5. E-mail: ayateterkowi@yahoo.com

На основе решений задач для аномального электромагнитного поля протяженной тонкой трещины и цилиндрического включения с произвольным значением удельной электропроводности показано, что для усталостной трещины составляющая поля рассеяния областью структурно измененного материала в окрестности трещины может многократно превосходить составляющую поля дифракции на границах трещины и зависит от характеристик этой области. Поэтому при вихретоковом контроле изделия установка браковочного уровня по сигналу от эталонной искусственной трещины должна основываться на учете физико-химических условий образования трещины в процессе эксплуатации данного изделия. Библиогр. 13, табл. 1, рис. 5.

Ключевые слова: вихретоковый контроль, усталостная трещина, удельная электропроводность, аномальное электромагнитное поле

В вихретоковой (ВТ) дефектоскопии модель объекта контроля (ОК) с дефектом типа трещины базируется на электродинамическом анализе кусочно-однородной структуры и отображает дифракционную суть формирования трещиной аномального поля (АП) дефекта [1, 2]. Согласно этой традиционной модели аномальная составляющая поля дефекта в результирующем электромагнитном поле (ЭМП) формируется вследствие дифракции первичного ЭМП на границах трещины. Однако такая модель только частично отражает процесс формирования АП реальной или так называемой усталостной трещиной, зарождающейся и развивающейся в конструкционных материалах в процессе эксплуатации изделий [3, 4]. Недостатком традиционной модели является то, что она не учитывает значительных изменений электрофизических характеристик материала ОК, обусловленных структурными изменениями материала в окрестности трещины в процессе ее образования.

В механике разрушения материалов различают три вида разрушений: хрупкое, квазихрупкое и вязкое. Для конструкционных материалов характерны хрупкое и квазихрупкое разрушение. В процессе зарождения и развития трещины выделяют четыре основные стадии [3], изменение структуры материала в которых представляет интерес с точки зрения ВТ дефектоскопии, а именно: инкубационный период, характеризующийся изменением субструктуры во всем объеме металла и концентрацией пластической деформации в приповерхностном слое вследствие его технологической дефектности; зарождение системы субмикротрещин в приповерхностном слое, где рас-

тет концентрация напряжений; распространение систем микротрещин и образование магистральной макротрещины; рост макротрещины до критического размера.

При этом отметим, что чувствительность ВТ контроля позволяет исследовать процесс зарождения и развития трещин на всех стадиях [5].

При достижении критического размера макротрещина растет спонтанно до момента разрушения. Продолжительность этой стадии мала и не имеет практического значения для прогнозирования. Однако период структурных изменений материала до зарождения макротрещины и ее развития до критического размера обычно довольно длительный и зависит от материала, схемы и характера нагрузок, температуры и свойств рабочей среды [3, 6–8], что чрезвычайно важно для выработки браковочного критерия при неразрушающем контроле конкретного изделия.

В результате структурных изменений в окрестности трещины формируется область, удельная электропроводность и магнитная проницаемость материала в которой существенно отличаются от основного материала. Так, удельная электропроводность может изменяться на десятки процентов. Значительно больше, особенно для аустенитных сталей, может изменяться магнитная проницаемость. Размеры этой области по ширине составляют от сотен микрон до нескольких миллиметров, а ее объем на 3...4 порядка превышает объем между берегами трещины [9]. Учитывая значительные размеры области структурно измененного материала в окрестности усталостных трещин, рассеяние первичного ЭМП в этой области существенно влияет на формирование АП трещины, а сигнал вихретокового преобразователя от усталостной

трещины может значительно превосходить сигнал от искусственной трещины такой же глубины. Поэтому нормативными документами предусматривается, что контрольный образец с искусственным (эталонным) дефектом, например, типа трещины в виде тонкого разреза заданной ширины и глубины должен использоваться только для установки уровня сигнала отбраковки деталей аппаратурой ВТ контроля [10]. При этом принимается, что контроль обеспечивает обнаружение трещин, глубина которых в 5...7 раз меньше глубины эталонной трещины. Однако следует иметь в виду, что соотношение сигналов глубина эталонной/глубина усталостной трещины, которое задают при установке браковочного уровня, существенно зависит от материала и условий эксплуатации конкретной детали и не может быть унифицировано для широкой номенклатуры деталей и изделий.

Цель работы – исследование оценки составляющей аномального поля, обусловленной локальной областью структурно измененного материала в окрестности усталостных трещин, в сравнении с составляющей поля дифракции на трещине.

Поскольку в теории ВТ контроля соответствующая физическая модель формирования аномального поля усталостной трещиной не рассматривалась [1, 11], то для исследования нами используются полученные в строгой постановке решения таких двух задач: аномальное ЭМП тонкого продольного дефекта типа трещины в электропроводящем полупространстве [12] и аномальное ЭМП кругового цилиндрического включения в электропроводящем полупространстве [13]. При этом под строгой постановкой понимается, что при сведении исходной физической задачи к математической были использованы лишь основные законы электромагнетизма и математические теоремы.

Аномальное поле трещины в электропроводящем полупространстве. На рис. 1 представлена схема протяженного дефекта типа трещины в однородном электропроводящем полупространстве.

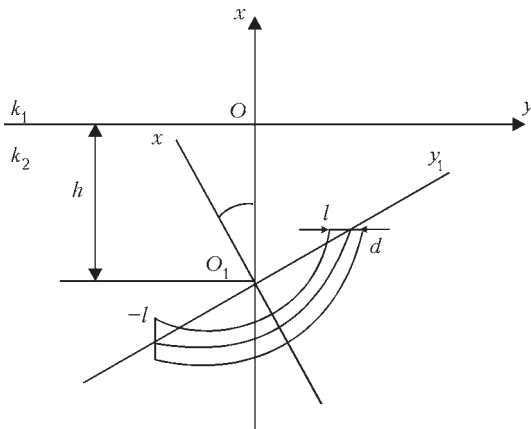


Рис. 1. Схематическое изображение трещины (обозначения см. в тексте)

Здесь (xOy) – базовая и $(x_1O_1y_1)$ – локальная системы координат. Параметры трещины охарактеризованы длиной l , шириной раскрытия d , глубиной залегания h , углом наклона к поверхности α и кривизной ε ; $k_1 = 0, k_2 \neq 0$ – волновые числа верхнего и нижнего полупространства. Первичное электромагнитное поле представляет собой E_z – поляризованную плоскую волну.

Как показано в работе [1], для тонкого диэлектрического включения электрическая составляющая поля изменяется по его толщине незначительно, поэтому принимается независимой от толщины дефекта и равной некоторому значению на его средней линии L , где L – гладкий контур Ляпунова. При этом решение задачи дифракции первичного ЭМП на тонкой трещине сведено к интегральному уравнению:

$$E(t_0) - d(k_2^2 - k_3^2) \int_L E(t) G^{(2)}(t, t_0) ds = E^*(t_0), \quad (1)$$

где $G^{(2)}(t, t_0) = (i/4)H_0^{(1)}(k_2 r) + (1/(2\pi)) \times$

$$\begin{aligned} & \times \int_0^\infty \exp[v_2(y + y_0)] \times \\ & \times (v_2 - v_1) / [v_2(v_1 + v_2)] \cos(q(x - x_0)) dq; \\ & v_{1,2} = \sqrt{q^2 - k_{1,2}^2}; \quad \text{Re}(v_{1,2}) \geq 0; \\ & t = t(s) \equiv x(s) + iy(s); \quad t_0 = L. \end{aligned}$$

Здесь $H_0^{(1)}(k_2 r)$ – функция Ганкеля первого рода; $E^*(t_0)$ – известное распределение электрической (вдоль оси Oz) составляющей ЭМП при отсутствии трещины; $E(t)$ – неизвестное распределение электрической составляющей ЭМП, обусловленное наличием трещины; s – дуговая абсцисса средней линии L сечения трещины плоскостью xOy ; r – расстояние между двумя точками контура L с аффиксами t и t_0 и дуговыми абсциссами s и s_0 ; k_3 – волновое число включения; $G^{(2)}(t, t_0)$ – функция Грина дифракционной задачи для полупространства.

В результате решения на основе метода механических квадратур для интегрального уравнения в работе [12] получена алгебраическая система уравнений:

$$\begin{aligned} E_l - \sum_{k=1}^N a_{lk} E_k &= E_l^*, \quad l = 1, \dots, N, \quad (2) \\ E_l &= E(\tau_l), \quad E_l^* = E^*(\tau_l), \quad t \in \hat{t}(\tau), \\ a_{lk} &= (d(k_2^2 - k_3^2) / (2\pi)) A_k \left| \frac{t'_k}{t'_l} \right| (S(\tau_k, \tau_l) + K(\tau_k, \tau_l)), \\ K(\tau_k, \tau_l) &= 2\pi G^{(2)}(t_k, t_l) + \ln |\tau_k - \tau_l|, \\ t'_k &= t'_k(\tau_k), \end{aligned}$$

где A_i – весовые коэффициенты; τ_i – узлы в квадратных формулах.

На основании решения системы уравнений (2) напряженность электрического поля в верхнем полупространстве рассчитывается по формуле:

$$E(x, y) = E^*(x, y) + d(k_2^2 - k_3^2) \sum_{k=1}^N A_k G^{(1)}(t_k, t) E_k, \quad (3)$$

$$\text{где } G^{(1)}(t_k, t) = (1/\pi) \int_0^\infty \exp[y_k v_2 - y v_1] \times \\ \times \cos(q(x_k - x)) / (v_1 + v_2) dq; \\ t = x + iy; \quad t_k = x_k + iy_k;$$

а составляющие напряженности аномального магнитного поля трещины определяются следующими соотношениями:

$$H_x^a(x, y) = \frac{-i}{\omega \mu} \frac{\partial}{\partial y} \left(d(k_2^2 - k_3^2) \int_L E(t) G^{(1)}(t, t_0) ds \right), \quad (4)$$

$$H_y^a(x, y) = \frac{i}{\omega \mu} \frac{\partial}{\partial x} \left(d(k_2^2 - k_3^2) \int_L E(t) G^{(1)}(t, t_0) ds \right). \quad (5)$$

На рис. 2 представлена зависимость нормированной к первичному ЭМП составляющей $H'_{ya}(L, h_{зал})$ аномального поля трещины в эпикентральной точке ($x = 0, y = 0$) на поверхности полупространства (см. рис. 1) от длины и глубины залегания трещины. При этом глубину залегания трещины под поверхностью удобно рассматривать как остаточную толщину $h_{зал}$, или расстояние от поверхности полупространства до вершины трещины. Ширина трещины составляет $d = 0,2$ мм; длина трещины изменяется в интервале $0,1 \dots 1,7$ мм, а глубина залегания в интервале $0,1 \dots 1,0$ мм; удельная электропроводность принята равной $\sigma_2 = 16$ МСм/м. Частота первичного ЭМП составляет $f \approx 2$ кГц, глубина проникновения вихревых токов $\delta = \sqrt{2/\omega \sigma_2 \mu_0} \approx 2,8$ мм.

Размеры эталонной искусственной трещины, по сигналу от которой устанавливают в аппаратуре ВТ контроля уровень отбраковки, могут составлять $0,1 \dots 0,2$ мм по ширине и по глубине ми-

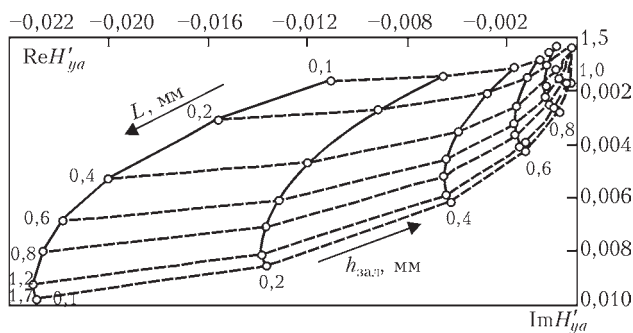


Рис. 2. Годографы зависимости составляющей H'_{ya} аномального поля от длины трещины

нимум $0,5$ мм. Из годографов видно, что уровень составляющей $\text{Mod } H'_{ya}$ аномального поля эталонной трещины таких размеров может составлять до 2% уровня первичного ЭМП. При этом аппаратура ВТ контроля, как полагается в работе [10], должна обеспечивать обнаружение трещин в изделии с минимальной глубиной около $0,05$ мм. Усталостные трещины такой глубины имеют раскрытие d в несколько микрон, что практически на два порядка меньше раскрытия $d = 0,2$ мм искусственной эталонной трещины. В расчетных формулах раскрытие трещины d входит как масштабный множитель, что определено постановкой задачи. При этом уровень аномального поля трещины глубиной $0,05$ мм (без учета влияния области структурно измененного материала в окрестности усталостной трещины) должен быть на два порядка меньше, т.е. около $0,02\%$ уровня первичного электромагнитного поля. Чтобы корректно оценить уровень аномального поля, обусловленного областью структурно измененного материала в окрестности усталостной трещины, воспользуемся решением задачи дифракции ЭМП на круговом цилиндрическом электропроводящем включении в электропроводящем полупространстве [13].

Аномальное поле электропроводящего включения. На рис. 3 представлена схема цилиндрического включения радиуса a , удельная электропроводность которого может иметь произвольное значение. В частности, для рассматриваемого случая удельная электропроводность включения имитирует структурно измененный материал в процессе образования трещины и задана в интервале $0 \leq \sigma_3 \leq \sigma_2$. Это позволяет исследовать как влияние несплошности ($\sigma_3 = 0$) в основном материале, так и влияние локального изменения удельной электропроводности на формирование составляющей аномального поля в результирующем ЭМП. Первичное электромагнитное поле представляет собой E_z – поляризованную плоскую волну.

Для расчета составляющих векторов аномального поля цилиндрического включения в электропроводящем полупространстве дифракционная задача сведена к решению скалярного волнового уравнения относительно z -компоненты векторного потенциала ЭМП [13].

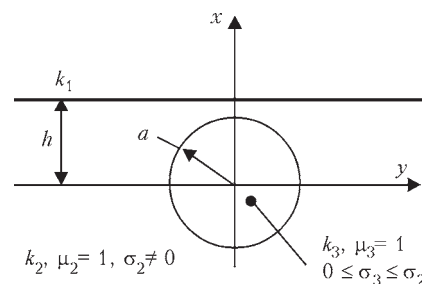


Рис. 3. Схема цилиндрического включения

Формулы для расчета составляющих напряженности аномального магнитного поля включения в отношении к нормальной составляющей результирующего поля имеют следующий вид:

$$H'_{ra} = (C_*^e - 1) e^{-k_2 h} e^{k_2 r \cos \varphi} \sin \varphi + 0,5 e^{-k_2 h} C_*^e \sum_{n=0}^{\infty} \gamma_n p_n^e [K_{n-1}(k_2 r) - K_{n+1}(k_2 r)] \sin n\varphi, \quad (6)$$

$$H'_{\phi a} = (C_*^e - 1) e^{-k_2 h} e^{k_2 r \cos \varphi} \cos \varphi + 0,5 e^{-k_2 h} C_*^e \sum_{n=0}^{\infty} \gamma_n p_n^e [K_{n-1}(k_2 r) + K_{n+1}(k_2 r)] \cos n\varphi, \quad (7)$$

где $C_*^e = \left(1 + e^{-k_2 h} \sum_{k=0}^{\infty} \gamma_k p_k^e K_k(k_2 h) \right)^{-1}$;

$$\gamma_n = \begin{cases} 1, & n, k = 0; \\ 2, & n, k = 1, 2, 3 \dots \end{cases}$$

Влияние параметров цилиндрического включения определяется коэффициентом p_n^e . Для случая, когда материал включения электропроводящий ($\sigma_3 \neq 0$), коэффициент p_n^e определяется выражением:

$$p_n^e = \frac{k_3 I_n(k_2 a) I'_n(k_3 a) - k_2 I'_n(k_2 a) I_n(k_3 a)}{k_3 K_n(k_2 a) I'_n(k_3 a) - k_2 K'_n(k_2 a) I_n(k_3 a)}, \quad (8)$$

где $k_2 = \sqrt{i\omega\sigma_2\mu_0}$; $k_3 = \sqrt{i\omega\sigma_3\mu_0}$,
 $\sigma_2 \neq 0$; $\sigma_3 \neq 0$.

В случае неэлектропроводящего включения ($\sigma_3 = 0$) коэффициент p_n^e определяется выражением:

$$p_n^e = -\frac{I_{n+1}(k_2 a)}{K_{n+1}(k_2 a)}. \quad (9)$$

В формулах (6)–(9) значения радиуса включения и глубины его залегания задаются в безразмерном виде, а именно – в отношении к глубине проникновения вихревых токов:

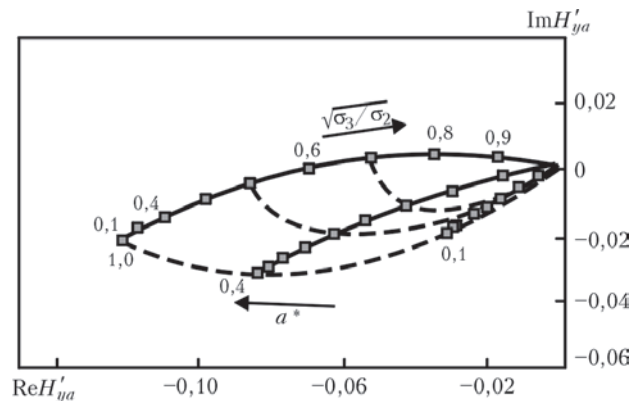


Рис. 4. Годографы влияния параметров цилиндрического включения на его АП

$$a^* = a\sqrt{\omega\sigma_2\mu_0} \text{ и } a^* = a\sqrt{\omega\sigma_3\mu_0}, \quad h^* = h\sqrt{\omega\sigma_2\mu_0}. \quad (10)$$

На рис. 4 представлена зависимость составляющей аномального поля включения $H'_{ya}(a^*; \sigma_3/\sigma_2)$ в эпицентральной точке ($x = h = a, y = 0$) на поверхности электропроводящего полупространства (см. рис. 3) от изменения радиуса включения в интервале значений $a^* = a\sqrt{\omega\sigma_2\mu_0} = 0 \dots 1,0$ и изменения удельной электропроводности включения в интервале $0 \leq \sigma_3 \leq \sigma_2$ для приповерхностного расположения включения $h = a$.

Из приведенных зависимостей видно, что величина удельной электропроводности включения оказывает значительное влияние на уровень АП. При этом выбором частоты ЭМП можно задавать величину радиуса a^* включения. Например, при $a^* = 0,4$ (соответствует $a = 12$ мм, $f \approx 25$ кГц, $\sigma_2 = 16$ МСм/м) и уменьшении удельной электропроводности включения на 20 % ($\sigma_3 = 0,8\sigma_2$) составляющая АП $\text{Mod } H'_{ya}$ будет $\approx 1,5$ % (рис. 4). При изменении электропроводности включения до 50 % составляющая АП $\text{Mod } H'_{ya}$ увеличится примерно до 4 %.

Очевидно, что составляющая АП области структурно измененного материала в окрестности усталостной трещины, характеризующаяся значительным объемом, может многократно превышать составляющую АП трещины.

Значительное изменение уровня АП при малых размерах локального включения ($a = 0,12$ мм) свидетельствует о перспективности исследования в механике разрушения материалов процессов образования усталостных трещин вихретоковым методом [3–5]. При этом современные методы обработки сигналов вихретокового преобразователя позволяют определять параметры включения [13], в частности, изменение его удельной электропроводности на разных стадиях развития трещины.

Штриховая кривая на рис. 4 соответствует приповерхностной цилиндрической полости ($\sigma_3 = 0$). Для заданных выше значений раскрытия трещины $d = 0,2$ мм, частоты $f \approx 2$ кГц и удельной электропроводности $\sigma_2 = 16$ МС/м относительное значение радиуса полости равно $a^* = 0,05$ ($2a = 0,2$ мм). Значение составляющей $\text{Mod } H'_{ya}$ аномального поля такой несплошности составляет примерно 15 %, что сопоставимо с уровнем АП эталонной трещины.

Аномальное поле усталостной трещины может быть представлено суперпозицией элементарных включений по сечению трещины, включая область структурно измененного материала в окрестности трещины [13]. В качестве элементарного могут быть приняты цилиндрическое вклю-

Погрешность приближения аномального поля трещины элементарными включениями в зависимости от частоты ЭМП при различной ориентации и глубине залегания трещины

$k_3 = \sqrt{0,75}k_2$	$\alpha = 90^\circ$			0			45°			
	ω , рад/с	10^3	10^4	10^5	10^3	10^4	10^5	10^3	10^4	10^5
$h_{\text{зал}} = 1,0 \text{ мм}$	$n = 2$	0,05799	0,96038	4,06494	0,05398	0,94278	11,4058	0,05711	0,96090	7,25687
	$n = 4$	0,08612	1,43608	7,00203	0,08026	1,41932	17,9117	0,08487	1,44157	11,9221
	$n = 6$	0,09524	1,59226	8,22466	0,08877	1,57684	20,1751	0,09387	1,59995	13,6185
	$n = 8$	0,09971	1,66955	8,89397	0,09295	1,65488	21,3169	0,09829	1,67838	14,4932
	$n = 10$	0,10237	1,71556	9,31463	0,09542	1,70136	22,0031	0,10091	1,72508	15,0260
$h_{\text{зал}} = 1,5 \text{ мм}$	$n = 2$	0,05951	0,95656	4,03882	0,05650	0,96206	11,3586	0,05888	0,96111	7,21087
	$n = 4$	0,08843	1,43458	6,96798	0,08404	1,44869	17,8349	0,08754	1,44460	11,8597
	$n = 6$	0,09782	1,59187	8,18868	0,09297	1,60957	20,0879	0,09685	1,60412	13,5510
	$n = 8$	0,10243	1,66975	8,85717	0,09736	1,68930	21,2243	0,10142	1,68313	14,4234
	$n = 10$	0,10516	1,71612	9,27737	0,09996	1,73677	21,9073	0,10412	1,73018	14,9547
$h_{\text{зал}} = 2,0 \text{ мм}$	$n = 2$	0,06064	0,95016	4,01947	0,05846	0,96645	11,3561	0,06022	0,95665	7,17812
	$n = 4$	0,09017	1,42766	6,94647	0,08697	1,45527	17,8319	0,08957	1,43963	11,8199
	$n = 6$	0,09975	1,58502	8,16789	0,09624	1,61684	20,0850	0,09910	1,59911	13,5096
	$n = 8$	0,10446	1,66296	8,83685	0,10079	1,69691	21,2215	0,10378	1,67812	14,3813
	$n = 10$	0,10725	1,70937	9,25736	0,10348	1,74459	21,9046	0,10656	1,72517	14,9123

чение или короткая трещина. Для моделирования АП усталостной трещины корректно использовать цилиндрическое включение, где учитывается и удельная электропроводность $\sigma_k(x_k, y_k)$ материала, и радиус $a_k(x_k, y_k)$ каждого элементарного включения. Кроме того, расчетные формулы (6)–(9) для АП цилиндрического включения просты и удобны для инженерных расчетов. В то же время решением для АП продольной трещины воспользуемся для оценки ошибки приближения АП включения типа трещины суперпозицией коротких трещин, расположенных вплотную по длине трещины.

На рис. 5 приведена схема трещины, которая изображена суперпозицией коротких трещин. В таблице представлены данные о погрешности приближения трещины длиной $l = 2 \text{ мм}$, представленной $n = 2, 4, 6, 8, 10$ короткими трещинами, залегающей на разной глубине $h_{\text{зал}} = 1,0; 1,5; 2,0 \text{ мм}$ и ориентированной под разными углами к поверхности. Удельная электропроводность материала включения принята равной $\sigma_2 = 0,75 \sigma_1$; частота первичного ЭМП составляет $\omega = 10^3; 10^4; 10^5 \text{ рад/с}$.

Полученные результаты показывают, что на низких частотах ($\omega = 10^3; 10^4 \text{ рад/с}$), когда длина волны ЭМП в электропроводящем полупространстве в сравнении с длиной трещины увеличива-

ется, погрешность приближения не превышает 2,0 %. Отметим также, что с увеличением количества элементов n погрешность приближения возрастает, поскольку взаимодействием между элементами в суперпозиции пренебрегается.

Подобные результаты получены и для приближения кругового включения равной по площади сечения суперпозицией элементарных включений. Аппроксимация аномального поля эталонной трещины (раскрытие $d = 0,2 \text{ мм}$; длина трещины изменяется в интервале $0,5 \dots 1,7 \text{ мм}$) суперпози-

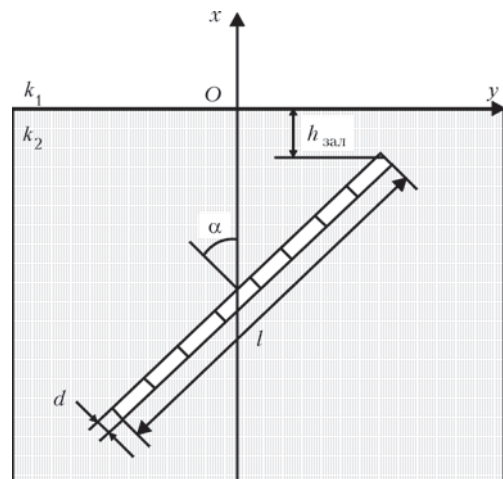


Рис. 5. Схематическое изображение трещины в виде суперпозиций коротких трещин

цией цилиндрических включений ($\sigma_3 = 0$) с эквивалентными параметрами показала, что составляющая $\text{Mod } H'_{ya}$ изменяется в интервале 1,3...1,6 % и хорошо согласуется с представленными выше результатами расчета для искусственной трещины (см. рис. 2). При этом важно отметить, что для приповерхностной трещины с увеличением длины трещины более 0,5...0,6 мм увеличение уровня АП быстро спадает и при $L > 1,5$ мм практически не изменяется. Эта «граничная» длина трещины определяется глубиной проникновения вихревых токов и, соответственно, может быть больше или меньше в зависимости от частоты электромагнитного поля.

Выводы

На основе решений прямых задач исследована структура аномального электромагнитного поля, сформированного усталостной трещиной в электропроводящем материале. Показано, что составляющая рассеяния электромагнитной волны областью структурно неоднородного материала в окрестности трещины может многократно превосходить составляющую дифракции на границах трещины. Аномальное поле локальной электропроводящей неоднородности в приповерхностном слое основного материала зависит от частоты электромагнитного поля и может достигать нескольких процентов от уровня первичного поля. Это позволяет эффективно использовать вихретоковый метод контроля для исследования процесса зарождения и развития усталостной трещины в конструкционных материалах.

В формировании аномального поля усталостной трещины преобладает влияние структурной неоднородности материала в окрестности трещины. Поэтому выбор параметров эталонного искусственного дефекта типа трещины (по ширине и глубине), сигнал от которого используют для установки браковочного уровня в аппаратуре при вихретоковом контроле конкретного изделия, дол-

жен основываться на учете условий образования трещины в процессе эксплуатации данного изделия и не может быть унифицирован для широкой номенклатуры изделий.

1. Панасюк В. В. Метод сингулярных интегральных уравнений в двумерных задачах дифракции / В. В. Панасюк, М. П. Саврук, З. Т. Назарчук. – К.: Наукова думка, 1984.– 344 с.
2. Назарчук З. Т. Численное исследование дифракции волн на цилиндрических структурах / З. Т. Назарчук. – К.: Наукова думка, 1989.– 254 с.
3. Романив О. Н. Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пос. в 4-х т; под общ. ред. В. В. Панасюка: Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов / О. Н. Романив, С. Я. Ярема, Г. Н. Никифорчин [и др.]. – К.: Наукова думка, 1990. – 680 с.
4. Механіка руйнування та міцність матеріалів: в 9-ти т.; під заг. ред. В. В. Панасюка. Т. 9: Міцність і довговічність авіаційних матеріалів та елементів конструкцій / О. П. Осташ, В. М. Федірко, В. М. Учанін [та ін.]; під ред. О. П. Осташа, В. М. Федірка. – Львів: Сполом, 2007.–1068 с.
5. О контроле усталостного ресурса изделий электромагнитным методом / А. Я. Тетерко, В. И. Ткачев, В. И. Витицкий [и др.]. // Физико-химическая механика материалов. – 1981. – № 1. – С. 93–95.
6. Осташ О. П. Деградація матеріалів і втомна міцність тривало експлуатованих авіаконструкцій / О. П. Осташ, А. М. Андрейко, Ю. В. Головатюк // Фізико-хімічна механіка матеріалів. 2006.–№ 4. – С. 5–16.
7. Nesterenko G. I. Ensuring structural damage of Russian aircraft / G. I. Nesterenko, B. G. Nesterenko // Int. J. Fatigue. – 2009. – 31. – P. 1054–1061.
8. Осташ О. П. Вплив тривалої експлуатації на структуру і фізико-механічні властивості алюмінієвих сплавів типу Д16 і В95 / О. П. Осташ // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2013. – № 1. – С. 18–27.
9. Когут Н. С. Трещиностойкость конструкционных материалов / Н. С. Когут. – Львов: Вища школа, 1986. – 158 с.
10. Руководящий документ РД 32 150-2000. МПС РФ. Вихретоковый метод неразрушающего контроля деталей вагонов. – М., 2000. – 35 с.
11. Неразрушающий контроль. Справ. в 8 т. – Т. 2. Вихретоковый контроль. Кн. 2; под ред. В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2006. – 954 с.
12. Назарчук З. Т. Аналіз електромагнітного поля під поверхневої тріщини за розв'язком інтегрального рівняння / З. Т. Назарчук, А. Я. Тетерко, В. І. Гутник // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2006. – № 5. – С. 69–74.
13. Тетерко А. Я. Селективна вихрострумова дефектоскопія / А. Я. Тетерко, З. Т. Назарчук. – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2004. – 248 с.

Based on solution of problems for anomalous electromagnetic field of extended thin crack and cylindrical inclusion with an arbitrary value of specific electric conductivity, it was shown that for a fatigue crack the component of field scattering by the region of structurally changed material in the vicinity of the crack can be many times higher than the component of diffraction field on crack borders, and depends on characteristics of this region. Therefore, at eddy current testing of an item, setting the rejection level by the signal from reference artificial crack should be based on allowing for physico-chemical conditions of crack formation in service of this item.

Keywords: eddy current testing, fatigue crack, specific electric conductivity, anomalous electromagnetic field

*Поступила в редакцию
20.06.2016*

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ МОСТОВИХ БАЛОК ТА РОЗРОБЛЕННЯ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ МОНІТОРИНГУ ДЕФОРМАЦІЙ

Я. Л. ІВАНИЦЬКИЙ, О. П. МАКСИМЕНКО, Ю. В. МОЛЬКОВ, П. С. КУНЬ, О. Я. ЧЕПІЛЬ

Фіз.-мех. ін.-т ім. Г. В. Карпенка НАНУ. 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5. E-mail: dep-12@ipm.lviv.ua

Сформульовано методику визначення залишкового ресурсу роботи залізобетонної балки з використанням енергетичного підходу. Розроблено оптико-цифрові засоби для реєстрації переміщень бокової поверхні балки в процесі статичних та циклічних навантажень та алгоритм реєстрації та обробки зображень для визначення величини локальних деформацій та прогину балок. Проведено лабораторні і натурні випробування засобів вимірювання під час досліджень моделі та випробувань моста. Показано, що результати визначення деформацій та прогинів оптико-цифровими засобами добре корелюють із даними розрахункових величин, отриманих згідно діючих нормативних документів. Бібліогр. 9, табл. 2, рис. 11.

Ключові слова: залізобетонна балка, напружено-деформований стан, енергія пружно-пластичного деформування, цифрова кореляція зображень, розподіли переміщень і деформацій

Мости є найбільш вразливими до руйнувань ділянками транспортних магістралей, тому потребують підвищеної уваги. В процесі їх експлуатації відбувається поступове руйнування елементів конструкції та втрата несучої здатності в результаті нагромадження незворотних пошкоджень. В першу чергу це відбувається у місцях з'єднань під впливом періодичних циклічних навантажень, фізико-хімічних процесів корозії бетонів, чинників зовнішнього середовища (температури, вологості) та технологічних дефектів. Періодичні та позапланові огляди мосту трудомісткі і носять суб'єктивний характер, а випробування мостів вимагає залучення великої кількості вантажного транспорту, встановлення систем вимірювання і тимчасового зупинення руху транспорту.

Розроблення і застосування сучасних мобільних пристроїв для моніторингу технічного стану мостів, які дають можливість проводити вимірювання під час експлуатації споруди та впровадження нових методик оцінки залишкового ресурсу на основі проведених вимірювань є актуальною науково-технічною задачею, вирішення якої забезпечить обґрунтованість встановлення міжремонтних періодів та підвищить безпечну експлуатацію транспортних споруд.

Встановлення міри енергетичної пошкодженості залізобетону. Оцінка залишкового ресурсу конструкції в цілому полягає у знаходженні елемента або вузла, де можуть нагромаджуватись пошкодження, які призводять до появи тріщин та втрати стійкості. Тому важливим є своєчасне встановлення таких місць та моніторинг напружено-деформованого стану у процесі експлуатації. В цьому плані важливим є моделювання процесу на-

громадження пошкоджень для оцінювання поточного стану та прогнозування залишкового ресурсу із врахуванням умов навантаження.

Для опису процесу нагромадження пошкоджень у бетоні та досягнення гранично-рівноважного стану вводиться гіпотеза руйнування, яка базується на енергетичному підході, що передбачає встановлення міри енергетичної пошкодженості в панельному об'ємі бетону.

За міру енергетичної пошкодженості бетону прийнято величину:

$$\omega(x,y,t) = W(x,y)/W_c \quad (1)$$

де W_c – питома енергія руйнування залізобетонної балки; $W(x,y)$ – енергія пружно-пластичного деформування.

Енергію руйнування залізобетонної балки визначають за статичного навантаження згином. При цьому будують діаграму руйнування в координатах «істинні напруження–істинна деформація». Площа під діаграмою руйнування і буде питомою енергією руйнування.

Енергія пружно-пластичного деформування залізобетону визначається як сума пружної і пластичної складових нижньої розтягнутої частини бетону і арматури за мінусом енергії стиску верхнього поясу балки:

$$W(P, x, y) = W_{БР}^e + W_{БР}^p + W_A^e + W_A^p - W_{Бс}^a - W_{Бс}^p.$$

Враховуючи зв'язок між деформацією за статичного та циклічного навантажень, отримаємо залежності для пружної і пластичної складових:

$$\varepsilon_e = \frac{\sigma_u}{E} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b, \quad (2)$$

де σ'_f – істинні напруження руйнування бетону або арматури; E – модуль Юнга; N_f – кількість циклів до руйнування; b – коефіцієнт регресії при пружному деформуванні.

При пластичному деформуванні величину деформації визначають за формулою:

$$\varepsilon_p = \varepsilon'_f (2N_f)^2, \quad (3)$$

де ε'_f – істинна деформація бетону або арматури.

Величина енергії пружної деформації для бетону розтягнутої зони визначається за формулою:

$$W_{БР}^e = \frac{(\sigma'_f)^2}{E} (2N_f)^{-b}. \quad (4)$$

Величина пластичної складової енергії деформування буде:

$$W_{БР}^e = \sigma'_f \varepsilon'_f (2N_f)^{-b-c},$$

де b, c – коефіцієнти регресії бетону для залежності $s \sim N$ пружної і пластичної областей відповідно.

Величину енергії руйнування бетону у розтягнутій зоні визначали шляхом випробування балкових зразків $100 \times 100 \times 400$ мм на триточковий згин.

Величину деформації бетону у розтягнутій зоні визначають шляхом вимірювання переміщень на боковій поверхні зразка методом цифрової кореляції зображень (ЦКЗ).

Величину деформацій у стиснутій зоні бетону визначали таким же методом.

Величину напружень визначали за формулою:

$$\sigma_{b,tm} = \frac{M_{\max}}{W}. \quad (5)$$

За результатами цих випробувань будували істинні діаграми руйнування бетону. Площа під ді-

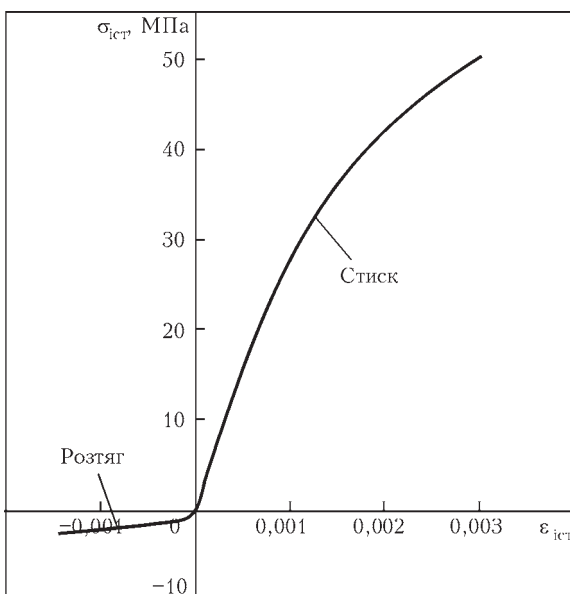


Рис. 1. Істинна діаграма руйнування бетону

аграмою «істинні напруження $\sigma_{b,tm}$ – істинна деформація $\varepsilon_{b,t}$ » рівна питомій енергії руйнування бетону (рис. 1).

Енергію руйнування арматури визначали при випробуванні розтягом арматурних зразків. За результатами випробувань арматури будували діаграму «істинні напруження $s_i \sim$ істинна деформація ε_i » (рис. 2). Величину істинної деформації визначали шляхом вимірювання переміщень методом ЦКЗ та наступним обчисленням за формулою:

$$\varepsilon_i = \ln(1/(1 - \psi_i)), \quad (6)$$

де ψ_i – відносне звуження зразка.

Величину істинних напружень визначали з врахуванням звуження поперечного перерізу арматури в момент утворення шийки за формулою:

$$\sigma_i = \frac{P}{F_0 - F_\delta}, \quad (7)$$

де P – зусилля навантаження; F_0 – початкова площа поперечного перерізу арматури; F_δ – біжуча площа перерізу арматури.

Зміну діаметра арматурного стержня в процесі навантаження вимірювали методом ЦКЗ.

Загальна формула, яка описує зміну енергетичної пошкодженості від кількості циклів для балки, навантаженої зусиллями P_{\min} і P_{\max} (рис. 3), має вигляд:

$$\begin{aligned} \sigma_{\max} \frac{\Delta\varepsilon}{2} = & \frac{(\sigma''_f)^2}{E_6} (2N_f)^{-2b} + \\ & + \sigma'_f \varepsilon'_f (2N_f)^{-b-c} + \frac{(\sigma''_f)^2}{E_A} + \\ & + \sigma''_f \varepsilon''_f (2N_f)^{-d-k} - \frac{(\sigma'''_f)^2}{E} (2N_f)^{-2b} - \\ & - \sigma'_f \varepsilon'_f (2N_f)^{-b-c} \end{aligned} \quad (8)$$

де σ'_f, σ'''_f – істинні напруження руйнування бетону за розтягу та стиску, які визначають із діаграми; σ''_f – істинне напруження руйнування арматури за статичного розтягу; E_6 – модуль пружності бетону; E_A – модуль пружності арматури; ε''_f – істинна критична деформація за статичного руйнування арматури; b – коефіцієнт регресії за пружного циклічного навантаження бетону у пружнопластичній області; d – коефіцієнт за циклічного навантаження арматурної сталі у пружній області; k – коефіцієнт регресії сталеної арматури; N – кількість циклів навантаження.

Таким чином, провівши експериментальні дослідження за статичного навантаження, визначають механічні характеристики бетону та арматури та, підставивши їх у формулу, можна розв'язати

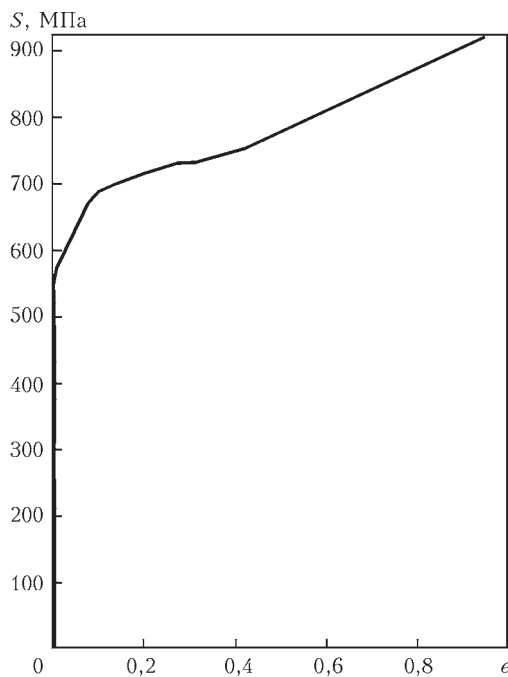


Рис. 2. Істинна діаграма руйнування арматурного стержня

трансцендентне рівняння відносно N і визначити кількість циклів до руйнування. При проведенні досліджень в лабораторних умовах необхідно визначити розмах деформацій та напружень за заданого навантаження. У пропонованій методиці ці величини визначають методом цифрової кореляції зображень (ЦКЗ). Для цього розроблено обладнання для ЦКЗ та створено алгоритми обробки зображень.

Встановлення локальних деформацій конструктивних елементів мостів. Враховуючи великі розміри мостів, доцільно спочатку розрахунковим шляхом з застосуванням методу кінцевих елементів або експериментально встановити найбільш навантажені місця конструкції, після чого визначити локальні деформації на вибраних ділянках.

Для визначення деформацій мостових балок до цього часу використовують тензометричні і механічні індикатори. Вимірювання переміщень такими приладами є достатньо трудомістким. Для забезпечення оперативного заміру деформацій у часі та підвищення точності при визначенні залишкового ресурсу конструкцій використовують сучасні безконтактні оптичні методи.

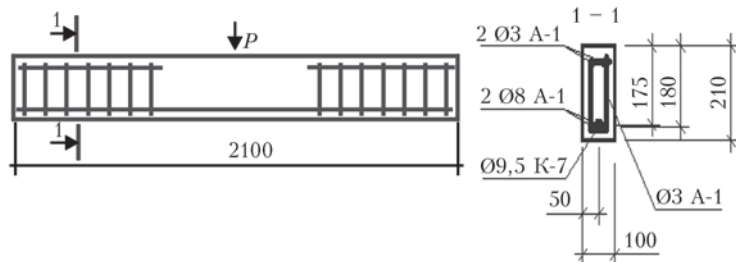


Рис. 3. Конструкція дослідних зразків

Найбільш простим у реалізації оптико-цифровим методом встановлення деформацій поверхні є ЦКЗ. Цей метод використовують в лабораторіях під час досліджень призматичних зразків бетону [1], вимірювання прогину балкових зразків [2, 9] та циклічних і динамічних випробовувань мостів [5]. Основною перевагою цього методу є безконтактність, мобільність та можливість встановити розподіл деформацій на усій поверхні балки [3].

Основні положення методу цифрової кореляції зображень. Для встановлення розподілу деформацій бокової поверхні балки методом ЦКЗ необхідно зареєструвати послідовно декілька цифрових зображення поверхні – перше без навантаження і наступне після прикладання навантаження. Після цього зареєстровані зображення за допомогою ПК і спеціалізованої програми автоматично розбиваються на однакову кількість фрагментів, які відтворюють в певному масштабі відповідні елементарні площадки поверхні балки. Відносні переміщення фрагментів першого і наступного зображення визначаються за алгоритмом ЦКЗ, реалізованим у спеціалізованій програмі [7]. Для реалізації вимірювань методом ЦКЗ розроблено оптико-цифровий корелятор (ОЦК), який являє собою цифрову фотокамеру з механізмом позиціонування і світлодіодним освітлювачем досліджуваної ділянки. До складу ОЦК входить також ПК із спеціалізованою програмою.

Послідовність роботи ОЦК.

1. Калібрування оптичної системи для виправлення геометричних спотворень об'єктива. Для цього використовують тестове зображення і спеціальну процедуру обробки, після якої отримують коефіцієнти для корегування геометричних спотворень [7].

2. Виділення ділянки на зображеннях, в межах якої необхідно встановити поле деформацій. Після чого програма автоматично ділить її на фрагменти і розраховує їх відносні переміщення та локальні деформації поверхні балки за різного навантаження.

3. Фіксація результатів вимірювань полів переміщень і деформацій. Локальні деформації поверхні балки визначались за допомогою співвідношень:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right], \\ \varepsilon_{yy} &= \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

Вимірювання локальних деформацій елементів моста за допомогою стаціонарного ОЦК. Для отримання кількісних

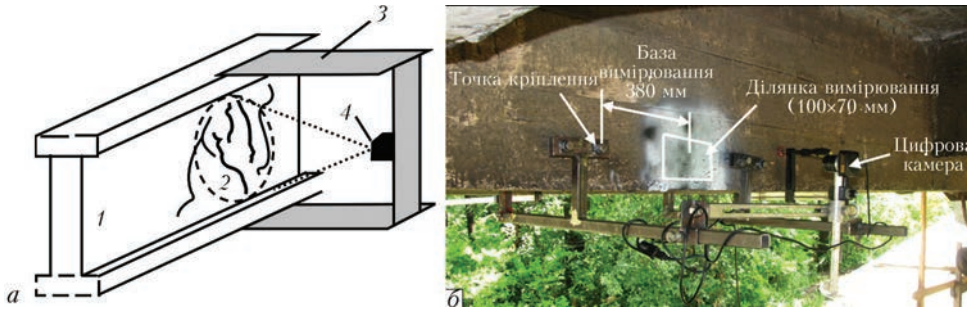


Рис. 4. Розміщення стаціонарного ОЦК на конструктивному елементі моста

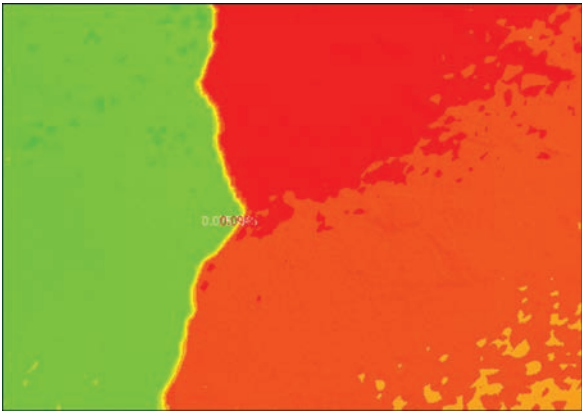


Рис. 5. Розподіл переміщень за максимального навантаження

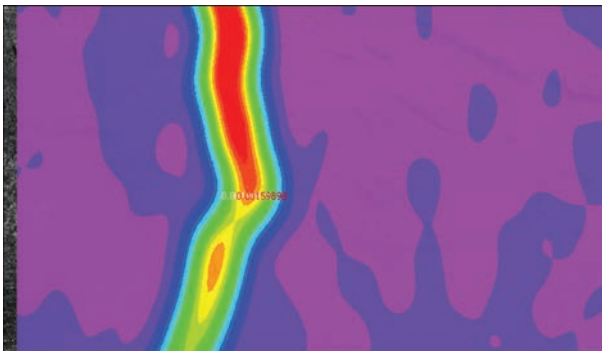


Рис. 6. Розподіл локальної деформації за максимального навантаження

показників енергетичної пошкодженості необхідно проводити постійний моніторинг стану конструкції в небезпечних місцях. Для цього в місцях виявлення небезпечних тріщин пропонується встановлювати ОЦК для реєстрації змін, які відбуваються під час експлуатації [8].

Стаціонарний ОЦК, який жорстко кріпиться до елемента конструкції, на невеликій відстані від досліджуваної ділянки, схематично показано на рис. 4, а: 1 – частина конструктивного елемента моста; 2 – область спостереження за тріщиноподібними дефектами; 3 – кріплення відеокамери до конструктивного елемента; 4 – відеокамера. Фото діючого ОЦК, встановленого на мостовій балці, наведено на рис. 4, б.

Величина виносу камери ОЦК від точки кріплення відповідає базі вимірювання відносної деформації мостової балки і складає 380 мм.

Такий пристрій дозволяє з високою точністю (в даному випадку $\pm 0,3$ мкм) виміряти переміщення поверхні, що потрапляє в поле зору камери, і обчислити відносну деформацію – відношення величини переміщення ділянки спостереження на поверхні балки до величини бази.

Розроблений пристрій апробовано в ході випробувань реконструйованого моста на кільцевій дорозі (м. Львів). За допомогою розробленого ОЦК одер-

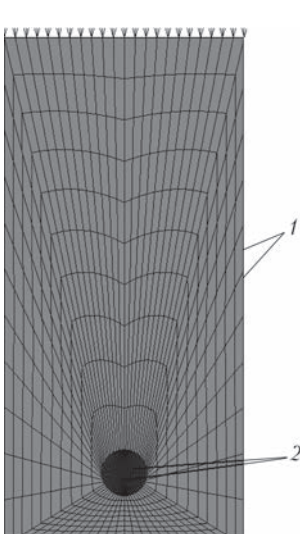


Рис. 7. Поперечний переріз бетонної балки (1) із вмонтованою апаратурою (2)

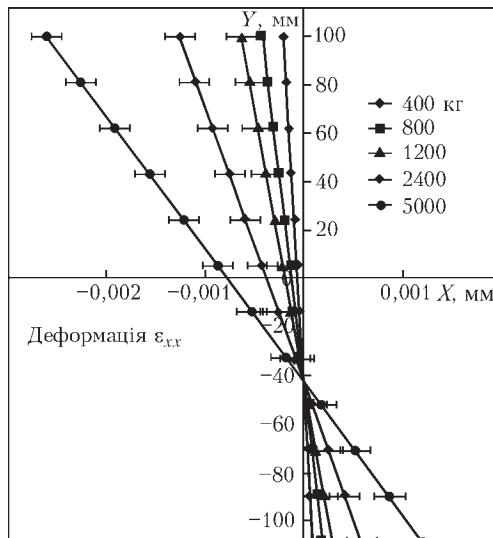


Рис. 8. Розподіл деформацій по висоті балки: крапки – одержано за допомогою ОЦК, лінії – розрахунок за методом скінченних елементів (МСЕ)

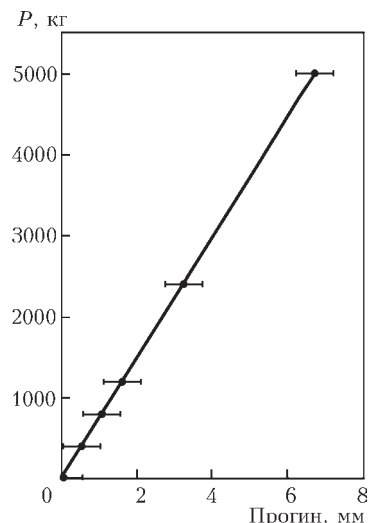


Рис. 9. Прогин центральної частини балки в залежності від навантаження: пряма – розрахунок за МСЕ, крапки – вимірювання за методом ЦКЗ

Таблиця 1. Результати вимірювання переміщень і деформацій

Навантаження (кількість автомобілів)	Вимірювання 1		Вимірювання 2	
	Переміщення, мм	Деформація, %	Переміщення, мм	Деформація, %
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
1	0,0053	0,0014	-0,0046	-0,0012
2	0,0615	0,0162	-0,0082	-0,0021
4	0,0985	0,0259	-0,0071	-0,0019
2	0,0798	0,0210	-0,0095	-0,0025
1	0,0767	0,0202	-0,0079	-0,0021
0	0,0355	0,0093	-0,0062	-0,0016

Таблиця 2. Механічні характеристики бетону та арматури

Напруження, МПа			Деформації $\epsilon \times 10^{-5}$			Постійні матеріалу			
σ'_f	σ''_f	σ'''_f	ϵ'_f	ϵ''_f	ϵ'''_f	B	c	d	k
2,63	950	33	1,55	0,95	2,5	0,02	0,2	0,07	0,5

жано розподіл переміщень і локальної деформації на всій ділянці вимірювання в полі зору камери (рис. 5, 6). В межах ділянки вимірювання виявлено тріщини, розкриття яких за максимального навантаження складали в середньому 0,01мм. Результати вимірювання відносної деформації для другої від краю балки середнього прогону моста наведено в табл.1. Міст навантажували шляхом встановлення на відповідній ділянці прогону автомобілів, навантажених піском. Вимірювання 1 відповідає встановленню навантаження безпосередньо над балкою, а вимірювання 2 проведено при встановленні автомобілів на протилежному боці прогону моста.

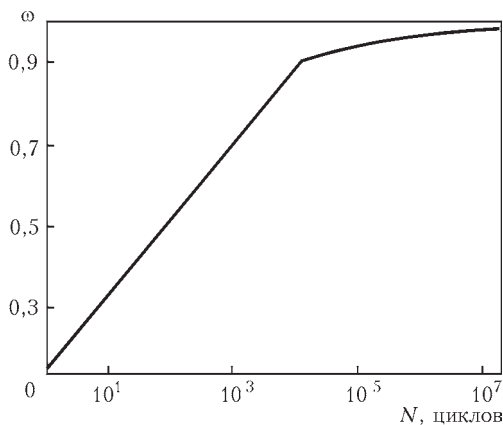


Рис. 10. Нагромадження пошкодженості в бетонній балці

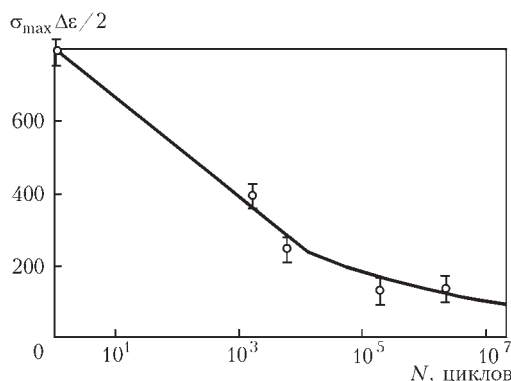


Рис. 11. Залежність енергії руйнування від кількості циклів навантаження

Експериментальне визначення енергії пошкоджуваності залізобетонної балки за циклічного навантаження. Дослідження здійснювали за циклічного навантаження залізобетонної балки (див. рис. 3) наступним чином. Балку навантажували ступенями статичним зусиллям і реєстрували ОЦК поле переміщень на боковій поверхні. Після цього здійснювали обробку зображень і визначали розподіл деформацій по висоті балки. Розподіл деформацій, отриманий методом ОЦК, порівнювали із результатами розрахунку МКЕ. При розрахунку тіло балки і арматури розбивали на 70000 паралелепіпедних восьмивузлових елементів (див. рис. 7). Розрахунок здійснено для п'яти ступенів навантаження: $P_1 = 4000$ Н; $P_2 = 8000$ Н; $P_3 = 12000$ Н; $P_4 = 24000$ Н; $P_5 = 50000$ Н. Результати обчислень представлено на рис. 8.

Аналогічно здійснено порівняння результатів величин прогину балки в центральній її частині (рис. 9).

Проведене зіставлення результатів, отриманих МСЕ та зареєстрованих за допомогою ОЦК, показує добру збіжність результатів. Це дає підстави стверджувати, що визначивши правильно величину істинних деформацій при згині балки у найбільш навантаженому місці та знаючи величину істинних напружень відповідно в розтягнутій і стиснутій зонах бетону, а також в арматурі можна встановити енергію руйнування залізобетонної балки. Величину істинних напружень бетону стиснутої і розтягнутої зон, а також арматури визначають на основі відповідних істинних діаграм руйнування для кожного окремого випадку. Такі дослідження проведено і встановлено, що енергія руйнування залізобетонної балки $W_c = 800$ МПа.

Дослідження втомної міцності балки здійснювали при циклічному асиметричному навантаженні.

В процесі циклічного навантаження ОЦК реєстрували поле переміщень при максимальному

P_{\max} і мінімальному P_{\min} зусиллі циклу. Визначали розмах деформацій Δe циклу навантаження та величину максимального напруження із істинних діаграм руйнування.

Для залізобетонної балки поперечного перерізу 100×210×21000 мм побудовано графічну залежність зміни енергетичної пошкодженості від кількості циклів навантаження (рис. 10). Механічні характеристики бетону та арматури подано у табл. 2.

Результати експериментальних досліджень у вигляді залежності величини енергії деформування за один цикл від кількості циклів до руйнування подано на рис. 11. Лінією показано залежність, отриману за розрахунковою формулою (8), а крапками – результати експериментальних даних за циклічного деформування залізобетонної балки.

Висновки

Розроблено методику визначення залишкового ресурсу роботи залізобетонної балки з використанням енергетичного підходу.

Розроблено обладнання та програмне забезпечення для встановлення локальних деформацій залізобетонних балок у відповідальних місцях. Проведена експериментальна апробація розробленої апаратури на модельній та реальній конструкції моста та під час випробовування балок. Розроблений пристрій і програмне забезпечення знайде застосування у системах моніторингу залізобетонних конструкцій у реальному часі.

Проведені експериментальні дослідження, які передбачають точне вимірювання величини переміщень з роздільною здатністю 0,0001 мм при циклічному навантаженні та розрахунок розмаху деформацій і визначення енергії пружно-пластичного деформування, що дає змогу прогнозувати кількість циклів до руйнування.

Procedure for determination of residual operating life of a concrete beam with application of energy approach was formulated. Optico-digital means for recording beam lateral surface displacements during static and cyclic loading and an algorithm for image recording and processing to determine the magnitude of local deformations and sagging of beams were developed. Laboratory and full-scale testing of measuring tools were conducted during model investigations and bridge testing. It is shown that the results of determination of deformations and sagging by optico-digital means correlate with the data on design values, derived in keeping with existing normative documents.

Keywords : concrete beam, stress-strain state, energy of elastic-plastic deformation, digital correlation of images, distribution of displacements and deformations

1. Choi S. Measurement of Deformations on Concrete Subjected to Compression Using Image Correlation / S. Choi, S. P. Shah // *Experimental Mechanics*. – 1997. – Vol. 37, № 3. – P. 307–313.
2. Дослідження напружено-деформованого стану залізобетонних попередньо напружених балок методом цифрової кореляції зображень / П. М. Коваль, Я. Л. Іваницький, Ю. В. Мольков [та ін.] : Зб. наук. пр. Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. В. Лазаряна. – 2012. – Вип. 3. – С. 75–79.
3. Оптико-цифровий метод визначення полів деформацій на локальних ділянках залізобетонних мостів / Я. Л. Іваницький, О. П. Максименко, Р. М. Запоточний [та ін.] // *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. – 2015. – № 2. – С. 104–108.
4. Noncontact Photogrammetric Measurement of Vertical Bridge Deflection / D. V. Jauregui, K. R. White, C. B. Woodward [et al.] // *Journal of bridge engineering*. – 2003. – P. 212–221.
5. Olaszek P. Investigation of the dynamic characteristic of bridge structures using a computer vision method / P. Olaszek // *Measurement*. 1999. – № 25. – P. 227–236.
6. The measurement of deformation of a bridge by moire photography and photogrammetry / C. Forno, S. Brown, R. A. Hunt [et al.] // *Strain*. – 1991. – P. 83–87.
7. Максименко О. Алгоритм обробки цифрових зображень для визначення деформаційних характеристик матеріалів / О. Максименко, Л. Франкевич, О. Сахарук // *Електроніка та інформаційні технології*. – 2013. – Вип. 3. – С. 156–168.
8. Моніторинг деформаційних процесів об'єктів тривалої експлуатації методом цифрової кореляції спекл-зображень / О. П. Максименко, І. С. Голинський, О. Г. Куць [та ін.] // *Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. Неруйнівний контроль матеріалів і конструкцій*: зб. наук. праць. – Львів, 2009. – Вип. 14. – С. 163–170.
9. Digital image correlation technique for thin beam specimen deformation and material moduli of elasticity measurements / «Fracture Mechanics of Materials and Structural Integrity» О. Maksymenko, O. Sakharuk, B. Ilchyshyn [et al.] // *Proceedings of 5th International Conference (June 24–27, 2014, Lviv, Ukraine)* / Ed. V. V. Panasyuk. – Lviv: Karpenko Physico-Mechanical Institute, 2014. – 880 p. P. 367–372.

Надійшла до редакції
26.04.2016

ExpoWELDING 2016

18–20 октября 2016 г.

г. Сосновице, Польша

Експо Силезия и Институт сварки Польши
проводят очередную сварочную выставку ExpoWELDING 2016

<http://exposilesia.pl>

Приглашаем посетить объединенный стенд украинских компаний № 111

РОЗРАХУНКОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВПЛИВУ ПРОМИСЛОВИХ ВИБУХІВ НА ТЕХНІЧНИЙ СТАН МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВОДІВ

В. М. ТОРОП

ІЕЗ ім. С. О. Патона НАНУ. 03680, Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Оцінка впливу промислових вибухів при розробці гранітного кар'єру на технічний стан аміакопроводу і магістральних газопроводів, які проходять по технологічному коридору на відстані не менше 300 м до відкритого гранітного кар'єру, виконана з припущенням про найбільш жорсту комбінацію негативних факторів. Перевірка безпеки експлуатації аміакопроводу та газопроводів від сейсмічної дії вибухів була виконана за допомогою експертної системи «Міцність». Для серій свердловинних зарядів діаметром 0,160 м з максимальною масою в групі уповільнення $Q = 680$ кг мінімально допустима відстань до аміакопроводу складе 132 м, а для газопроводів 129 м, в той час як для серій свердловинних зарядів діаметром 0,22 м з максимальною масою в групі уповільнення $Q = 1200$ кг мінімально допустима відстань до аміакопроводу буде 175 м, для газопроводів – 171 м. Поновлення розробки родовища гранітів з застосуванням буропідривних робіт з дотриманням елементів технології сейсmobезпечного підривання не буде негативно впливати на технічний стан магістральних трубопроводів. Бібліогр. 7, табл. 1, рис. 4.

Ключові слова: аміакопровід, газопроводи, технічний стан, промислові вибухи, експертна система

Гранітний кар'єр (гірничі роботи в якому останніми роками були призупинено) розташований на північно-східному схилі балки, по якій протікає річка. За межами гірничого відводу на відстані понад 300 м в південно-східному напрямку знаходяться: кабель зв'язку аміакопроводу, за ним траса діючого аміакопроводу, а за нею – два кабелі зв'язку, дві нитки газопроводів високого тиску діаметром 1020 та 820 мм, за ними лінія зв'язку та газопровід діаметром 720 мм.

Технологія проведення буропідривних робіт, що застосовується на гранітному кар'єрі, передбачає буріння свердловин на вибуховому блоці у 3-4 ряди з наступним короткоуповільненим підриванням свердловинних зарядів діагональними рядами. Схема комутації свердловинних зарядів здійснюється діагональними рядами з розташуванням діагональних груп миттєво ініційованих зарядів під певним кутом до напрямку траси магістрального аміакопроводу і газопроводів, що проілюстровано на рис. 1.

Діагональні ряди (групи) зарядів загальною масою вибухової речовини від 680 до 1200 кг ініціюються за допомогою детонуючого шнура і піротехнічних реле з інтервалами уповільнення між ними 20...35 мс або, якщо будуть застосовуватися неелектричні системи ініціювання «NONEL» або «Імпульс», інтервал уповільнення складе від 17 до 25 мс. Технологія буропідривних робіт передбачає короткоуповільнене підривання свердловинних зарядів діаметром 0,160...0,22 м.

Виходячи з цього, маса заряду в одній свердловині для 10 м уступу буде відповідно складати 170...300 кг, що для типової серії короткоуповільненого підривання складе в максимальній групі уповільнення 680...1200 кг.

За даними сейсмічних досліджень [1, 2], максимально можливі значення величини швидкості сейсмоколиваний ґрунту біля місця розташування траси аміакопроводу і газопроводів складуть відповідно 1,5...2,0 см/с.

За діючими нормами [3], допустимий рівень впливу сейсмічних хвиль для магістральних трубопроводів такого класу визначається 8 балами за шкалою MSK-64, що стосовно сейсмовибухових коливаний оцінюється швидкістю 12...24 см/с.

За умови ідеального контакту труби з ґрунтом максимальний додатковий тиск від сейсмічної хвилі для умов гранітного кар'єру $\Delta P = 0,1125$ МПа, якщо $V = 0,015$ м/с; $\rho = 2500$ кг/м³; $c = 3000$ м/с та $\Delta P = 0,15$ МПа якщо $V = 0,02$ м/с; $\rho = 2500$ кг/м³; $c = 3000$ м/с.

Враховуючи те, що різниця між розрахунковим і робочим тиском складає: для аміакопроводу $\Delta P_p = 12,9 - 7,9 = 5,0$ МПа, а для газопроводу $\Delta P_p = 7,0 - 4,9 = 2,1$ МПа, стає очевидним, що підвищення робочого тиску за рахунок впливу сейсмічної хвилі на 0,1125...0,15 МПа не буде становити небезпеки як для аміакопроводу, так і для газопроводів.

Перевірка безпеки експлуатації аміакопроводу від сейсмічної дії вибухів була виконана також за методикою [4], згідно з якою для серій свердло-

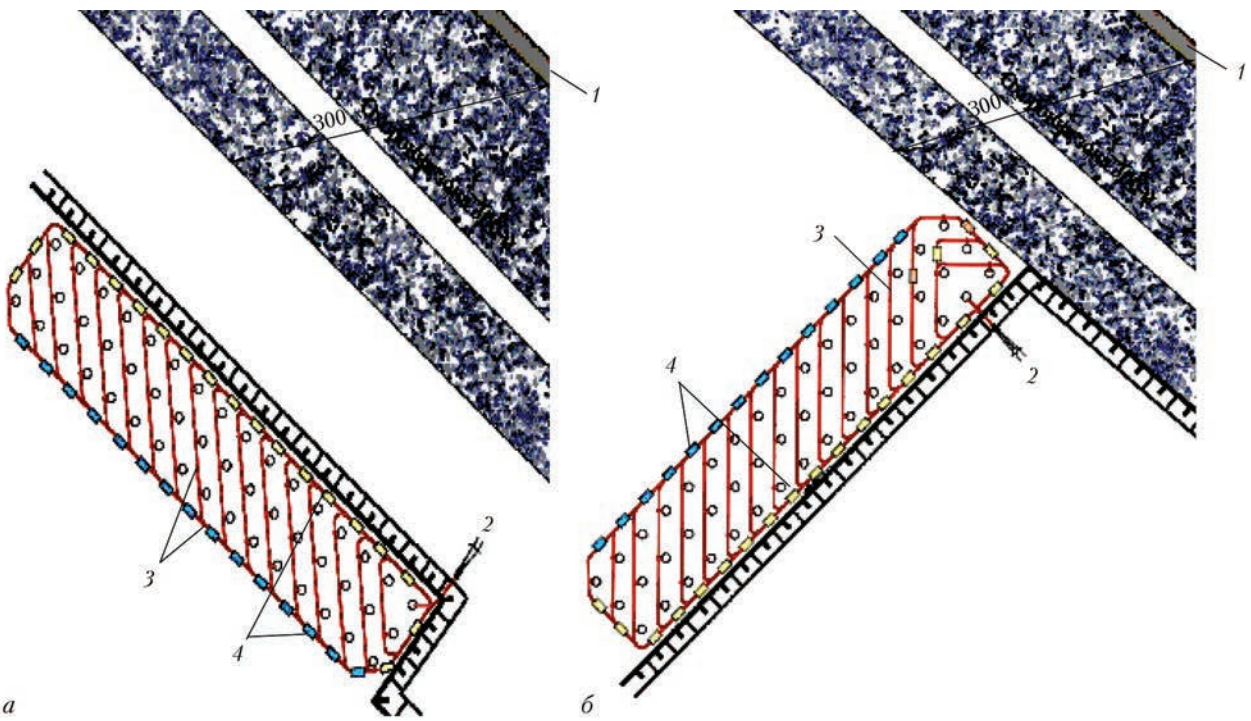


Рис. 1. Схеми комутацій вибухової мережі для типової серії свердловинних зарядів при фронтальному (а) та фланговому (б) розміщенні вибухового блоку: 1 – коридор аміакопроводу та газопроводів; 2 – напрямлення вибухів; 3 – детонаційний шнур; 4 – підриваючі реле

винних зарядів діаметром 0,160 м з максимальною масою в групі уповільнення $Q = 680$ кг мінімально допустима відстань до аміакопроводу складе 132 м, а для газопроводів відповідно 129 м.

Для серій свердловинних зарядів діаметром 0,22 м з максимальною масою в групі уповільнення $Q = 1200$ кг мінімально допустима відстань до аміакопроводу буде відповідно 175 м, для газопроводів 171 м.

Нагадаємо, що фактична відстань від межі гірничого відводу до аміакопроводу та газопроводу складає 300 м, що також підтверджує безпечні умови їх експлуатації при проведенні підривних робіт в кар'єрі методом короткоуповільненого підривання з найбільшою масою зарядів в групі уповільнення від 680 до 1200 кг.

З метою додаткової та незалежної оцінки впливу вибухової хвилі на напружено-деформований стан даного відрізка аміакопроводу та газопроводів були використані також норми США [5]. Для розрахунку вибрано самий небезпечний варіант розташування в діагональному ряду чотирьох свердловин діаметром 0,22 м на відстані 6 м одна від одної з фактичною масою заряду в кожній свердловині 300 кг та з кутим нахилу $\beta = 45^\circ$ діагонального ряду до магістралі аміако- та газопроводів.

Згідно з методикою [5], напруження від ударної хвилі, що передається на трубу, $\sigma = 52$ МПа. Ці середні напруження від ударної хвилі у комбінації з діючими в трубі напруженнями від внутрішнього тиску при робочому режимі не пере-

вищують 134 МПа.

Для оцінки небезпечності впливу вибухів на цілісність аміакопроводу необхідно порівняти визначені вище напруження з механічними властивостями сталі Х46 і врахувати можливі корозійні пошкодження внутрішньої поверхні труби та можливу деградацію механічних властивостей сталі в процесі експлуатації труби. Відповідь на ці питання дають результати виконаної роботи по комплексному обстеженню магістрального аміакопроводу «Тольятті–Одеса» (територія України) [6].

На рис. 2 показано рельєф (висотне положення) та розкладка труб на суміжній з кар'єром ділянці між постом секціонування та зворотнім краном

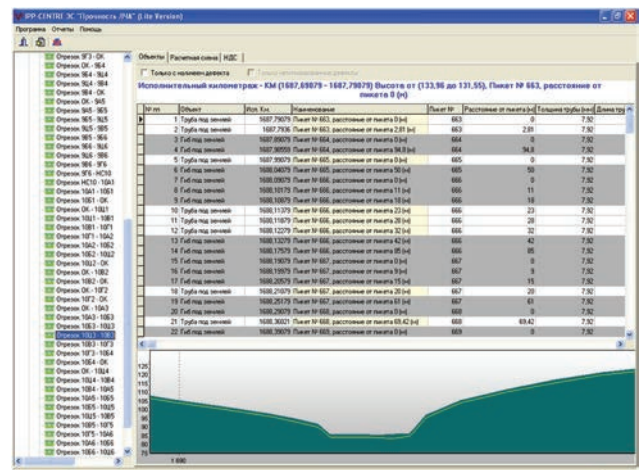


Рис. 2. Рельєф та розкладка труб на суміжній з кар'єром ділянці між постом секціонування та зворотнім краном магістрального аміакопроводу

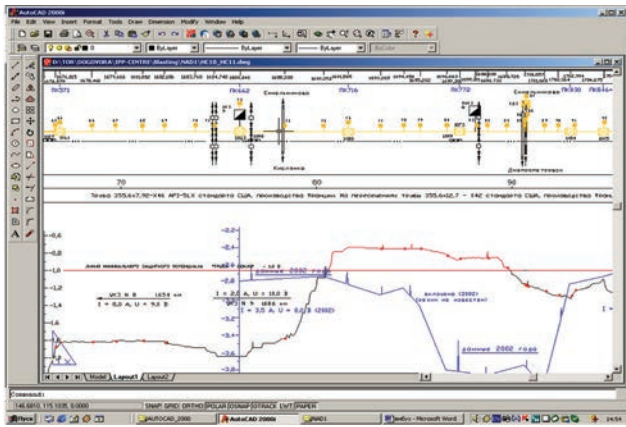


Рис. 3. Корозійна карта ділянки аміакопроводу поблизу кар'єра

аміакопроводу, що містить створена і впровадженна експертна система (ЕС) «Міцність» [7].

Для оцінки небезпечності впливу вибухів на цілісність аміакопроводу були проведені дослідження корозійних пошкоджень внутрішньої поверхні труби та деградації механічних властивостей сталі в процесі експлуатації магістрального аміакопроводу. Результати детальних корозійних обстежень, що проводились на вказаній ділянці аміакопроводу, наведено на корозійній карті рис. 3.

На даній корозійній карті представлено відрізок траси аміакопроводу між двома постами секціонування. В період обстеження аміакопроводу необхідності в шурфуваннях на даній ділянці не виникало. По результатах обстеження на даній ділянці було рекомендовано та проведено першочерговий ремонт ізоляційного покриття довжиною 14 м. Таким чином, на момент виконання даної роботи в безпосередній близькості до кар'єру відсутні ділянки аміакопроводу з пошкодженнями, а відремонтовані ділянки аміакопроводу не мали відчутних пошкоджень та до того ж перебувають на значній відстані від місця можливих буропідричних робіт.

Результати проведеного комплексу матеріалознавчих досліджень як архівних, так і поста-

рених (вирізаних на працюючому аміакопроводі темплетях) в процесі експлуатації матеріалів свідчать про наступне.

1. Хімічний склад дослідженої сталі X46, як в архівному, так і в постареному станах відповідає вимогам стандарту API 5L.

2. Виконані на працюючому аміакопроводі вирізки темплетів із сталі X46 дали можливість оцінити швидкість корозії труб з боку потоку аміаку. Середня швидкість корозії з боку внутрішньої поверхні основної труби діаметром 355,6 мм для сталі X46 складає від 10^{-4} до $2 \cdot 10^{-3}$ мм/рік, якщо прийняти за термін експлуатації 20 років. Ця швидкість істотно нижче за швидкість корозії на незахищеній зовнішній поверхні труби.

3. Службові механічні властивості сталі X46 після 20 років експлуатації (таблиця) практично залишаються на рівні початкових, тобто тих, які були при введенні аміакопроводу в експлуатацію, а саме у відповідності до вимог стандарту API5L мінімально гарантовані механічні властивості металу труб в стані поставки сталі X46 мають бути не менші, ніж: $\sigma_b = 434$ МПа, $\sigma_{0,2} = 317$ МПа; $\delta = 24$ %.

4. Процес експлуатаційного старіння металу основних трубопроводів не викликав значного пониження ударної в'язкості KCU, так що ця характеристика сталей все ще залишається на рівні, що задовольняє вимоги нормативної документації.

5. Польові вимірювання в шурфах твердості основного металу труб з сталі X46 корелюють з лабораторними вимірюваннями твердості постареного металу. Зіставлення цих даних з твердістю архівної сталі X46 свідчить про деякий вплив процесу старіння на твердість металу (збільшення твердості сталі X46 на 8,23 %). Характер цього впливу узгоджується з характером впливу старіння, встановленим при дослідженнях ударної в'язкості.

6. На основі фрактографічних досліджень можна стверджувати, що за даними випробувань

Фактичні механічні властивості сталі X46 за результатами вирізків з труб працюючого аміакопроводу

Орієнтація осі зразка по відношенню до осі труби	Межа міцності σ_b , МПа	Межа плинності $\sigma_{0,2}$, МПа	Відносне подовження δ_s , %	Відносне звуження Ψ , %
Основний метал, поздовжні зразки	<u>48,1...49,9</u> 49,2	<u>40,1...41,6</u> 41,0	<u>22,2...27,0</u> 25,2	<u>65,7...72,7</u> 70,3
Основний метал, поперечні зразки	<u>48,3...49,3</u> 48,9	<u>38,5...39,7</u> 39,1	<u>25,6...37,1</u> 32,0	<u>61,1...67,1</u> 65,3
Поздовжній зварний шов, поперечні зразки	<u>50,7...51,5</u> 51,0	—	—	—
Поздовжній зварний шов, поздовжні зразки	<u>50,9...52,3</u> 51,3	—	—	—
Кільцевий зварний шов, поздовжні зразки	<u>46,3...47,7</u> 46,9	—	—	—

Примітка. Над рискою – мінімальне і максимальне значення, під рискою – середнє значення за результатами п'яти експериментів

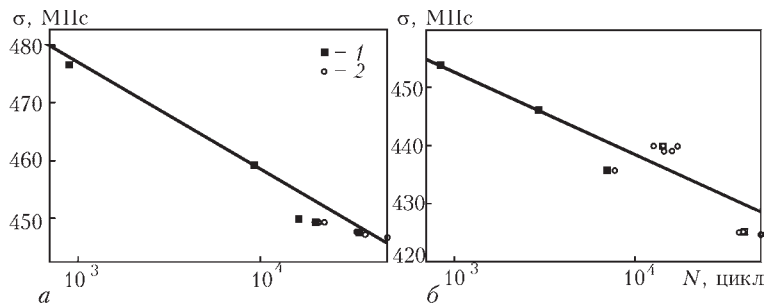


Рис. 4. Втомна міцність поздовжніх зразків металу поздовжнього (а) і кільцевого (б) зварних швів сталі Х46: 1 – випробування на повітрі; 2 – випробування в аміаку

зразків Менаже на ударну в'язкість в інтервалі температур $-40...0$ °С сталь перебуває в області крихко-в'язкого переходу, зберігаючи при цьому необхідний по нормах рівень ударної в'язкості. Процес експлуатаційного старіння надав деякий вплив на окрихчування сталі Х46, але не настільки істотний, щоб в інтервалі робочих температур перевести їх в повністю крихкий стан.

7. Проведені дослідження втомної міцності сталі амміакопроводу Х46 в рідкому аміаку і на повітрі показали відсутність агресивного впливу рідкого аміаку на їх корозійну втому (рис. 4).

Таким чином, не встановлено агресивного впливу рідкого аміаку на довговічність як основного металу досліджуваних марок сталей для амміакопроводу, так і металу зварних швів в архівному стані. Пояснення цього факту полягає в тому, що вода, яка додається в рідкий аміак 0,2...0,4 % є ефективним інгібітором корозійних процесів. Досліджені марки сталей по убуванню втомної міцності в рідкому аміаку поздовжніх зразків металу кільцевого зварного шва розташовуються таким чином: 09ГБЮ, Х46, 09Г2С і 20.

Висновки

Підсумовуючи означене вище, буде цілком правомірним стверджувати, що поновлення розробки родовища гранітів з застосуванням буропідливних робіт з дотриманням елементів технології сейсмобезпечного підривання не буде негативно впливати

Evaluation of the effect of industrial explosions at development of granite quarry and technical condition of ammonia line and main gas pipelines, which run through the technological corridor at not less than 30,0 m distance from open-pit granite quarry, was conducted with the assumption of the toughest combination of negative factors. Verification of operational safety of ammonia line and gas pipelines against seismic effect of explosions was performed using "Mitsnist" expert system. For sequences of deep-hole charges of 0.160 m diameter with maximum weight in delay group $Q = 680$ kg the minimum admissible distance to ammonia line will be equal to 132 m, and for gas pipelines it will be 129 m, respectively, while for sequences of deep-hole charges of 0.22 mm diameter with maximum mass in the delay group $Q = 1200$ kg, minimum admissible distance to ammonia line will be 175 m, and for gas pipelines it will be 172 m. Resumption of development of granite field with application of blasting operations, while observing the elements of seismosafe blasting technology, will have no adverse effect on the condition of the main pipelines. 7 References, 1 Table, 2 Figures.

Keywords: ammonia line, gas pipelines, technical condition, industrial explosions, expert system

ти на стан магістральних трубопроводів.

В подальшому з початком проведення гірничих робіт і поглибленням горизонтів відпрацювання необхідно уточнювати сейсмобезпечну масу зарядів як стосовно траси амміакопроводу і газопроводів, так і інших промислових і цивільних об'єктів.

Максимального зменшення сейсмічного впливу на всі навколишні цивільні та промислові об'єкти можливо досягти на підставі технології сейсмобезпечного підривання, яка буде враховувати особливості залягання і структуру гірського масиву, а також розташування, призначення і стан всіх наближених до кар'єру об'єктів.

Порівняння наявних фактичних механічних властивостей сталі Х46 з визначеним вище консервативно сумарним рівнем напружень в амміакопроводі показує, що навіть за самих несприятливих припущень запаси міцності залишаються на належному рівні.

1. Цейтлин Я. И. Сейсмические и ударные воздушные волны промышленных взрывов / Я. И. Цейтлин, Н. И. Смолий. – М.: Недра, 1981. – 192 с.
2. Швец В. Ю. Разработка технологии сейсмобезопасного взрывания скважинными зарядами на карьерах с учетом перераспределения энергии взрыва на дробление и сейсмоэффект: дис. ... канд. техн. наук / В. Ю. Швец. – Днепропетровск, 1988. – 145 с.
3. СНиП-45-75. Магистральные трубопроводы. Нормы проектирования. – М.: Стройиздат, 1975.
4. Гехман А. С. Сейсмостойкость трубопроводов. Научно-технический обзор. НИПИЭСУНефтегазстрой / А. С. Гехман, А. А. Меликян, В. В. Спиридонов. – М.: 1977. – 100 с.
5. Guidelines for the Design of Buried Steel Pipe. American Society for Civil Engineers (ASCE), July 2001, USA. – 76 p.
6. Тороп В. М. Комплексная диагностика аммиакопровода «Тольятти–Одесса» (территория Украины) / В. М. Тороп, Д. А. Дубицкий // Труды 12-й Международной деловой встречи «Диагностика 2002». – Апрель 2002, Турция. – Т.3, ч. 2. – М.: ИРЦ Газпром, 2002. – С. 8–12.
7. Тороп В. М. Оцінка граничного стану трубопроводів, резервуарів і посудин тиску на основі розробленої експертної системи: автореф. дис. докт. техн. наук / Тороп Василь Михайлович. – К., 2006. – 38 с.

АЛГОРИТМЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ КАНДИДАТА В ПРОЦЕССЕ СЕРТИФИКАЦИИ СПЕЦИАЛИСТОВ ПО НК

Н. Ф. ХОРЛО

ЧАО «ПТП «Укрэнергочермет». 61072, Харьков-72, пр-т Науки, 58. E-mail: uechm-nk.prom.ua

Выполнен анализ требований Международного стандарта ISO 9712:2012 к процедуре специальной подготовки кандидата перед проведением квалификационных экзаменов. Рассмотрены возможные алгоритмы подготовки кандидата с учетом его начального образовательного уровня и специфики выполняемых производственных задач по НК. Библиогр. 3, рис. 3.

Международный стандарт ISO 9712:2012 [1] устанавливает требования, которые кандидат на сертификацию должен выполнить перед проведением квалификационного экзамена по оцениванию компетенции для осуществления промышленного неразрушающего контроля (НК).

В общее понятие подготовки кандидата могут быть включены следующие компоненты: базовая подготовка кандидата; курс специальной подготовки в соответствии со стандартом ISO/TR 25107 [2]; специальные тематические курсы подготовки; участие в тематических конференциях, семинарах и тренингах; самостоятельное изучение учебных материалов по неразрушающему контролю и смежным дисциплинам.

Базовая подготовка кандидата включает знания, которые были получены кандидатом во время обучения в средней школе, профессионально-техническом или высшем учебном заведении различной степени аккредитации. Конкретных требований к уровню базовой подготовки стандарт [1] не устанавливает, за исключением следующих требований: кандидат должен иметь соответствующие математические навыки и предварительные знания материалов и процессов. Ключевым здесь является слово «соответствующие», т.е. знания и навыки прежде всего должны соответствовать заявленному кандидатом на сертификацию методу НК и квалификационному уровню, и могут варьироваться в значительных пределах. В качестве документального подтверждения наличия таких знаний и навыков кандидат должен предоставить в Орган по сертификации персонала (ОСП) аттестат или диплом, а в отдельных случаях и более подробную информацию по изученным дисциплинам.

Курс специальной подготовки в соответствии с требованиями стандарта ISO/TR 25107 кандидат должен пройти в объеме (рис. 1), предусмотренном стандартом ISO 9712 (табл. 2 стандарта) в учебном центре, компетенция которого признана ОСП на проведение такой подготовки. Кроме того, такой учебный центр должен соответство-

вать нормативным требованиям к учебным организациям, изложенным в стандарте ISO/TR 25108 [3]. Необходимо также учитывать, что стандарт ISO 9712 предусматривает изменение базового объема подготовки, который может быть или увеличен или уменьшен в зависимости от определенных факторов.

Вначале рассмотрим факторы, которые предусматривают увеличение объема подготовки кандидата на сертификацию (рис. 2). Прежде всего во время экспертизы ОСП заявительных документов кандидата принимаются в расчет исходные данные по подготовке кандидата – базовое образование (наличие у кандидата соответствующих математических навыков и предварительных знаний материалов и процессов) и прохождение специальных тематических курсов подготовки. В результате экспертизы документов, подтверждающих исходную подготовку кандидата, ОСП может назначить дополнительный к минимально необходимому объем подготовки. Кроме того, при определении промышленного сектора представитель ОСП должен определить, достаточен ли минимально необходимый объем подготовки (см. рис. 1) или он должен быть увеличен. Если же кандидат заявляется на 3-й квалификационный уровень, то в дополнение к минимальному объему подготовки ОСП должен назначить кандидату подготовку, которая может быть проведена различными способами в зависимости от научного и технического уровня кандидата, включая прохождение специального курса обучения, участие в конференциях, семинарах, изучение периодических или других специализированных печатных или электронных материалов.

Проанализируем случаи, предусмотренные стандартом ISO 9712, позволяющие применить снижение минимальных объемов подготовки. Таких условий может быть несколько.

1. Кандидаты проходят процедуру сертификации более чем по одному методу НК или сертифицированные специалисты подают в ОСП заявку как кандидаты на новый метод НК. Уменьшение объема подготовки применимо в том случае, если программы

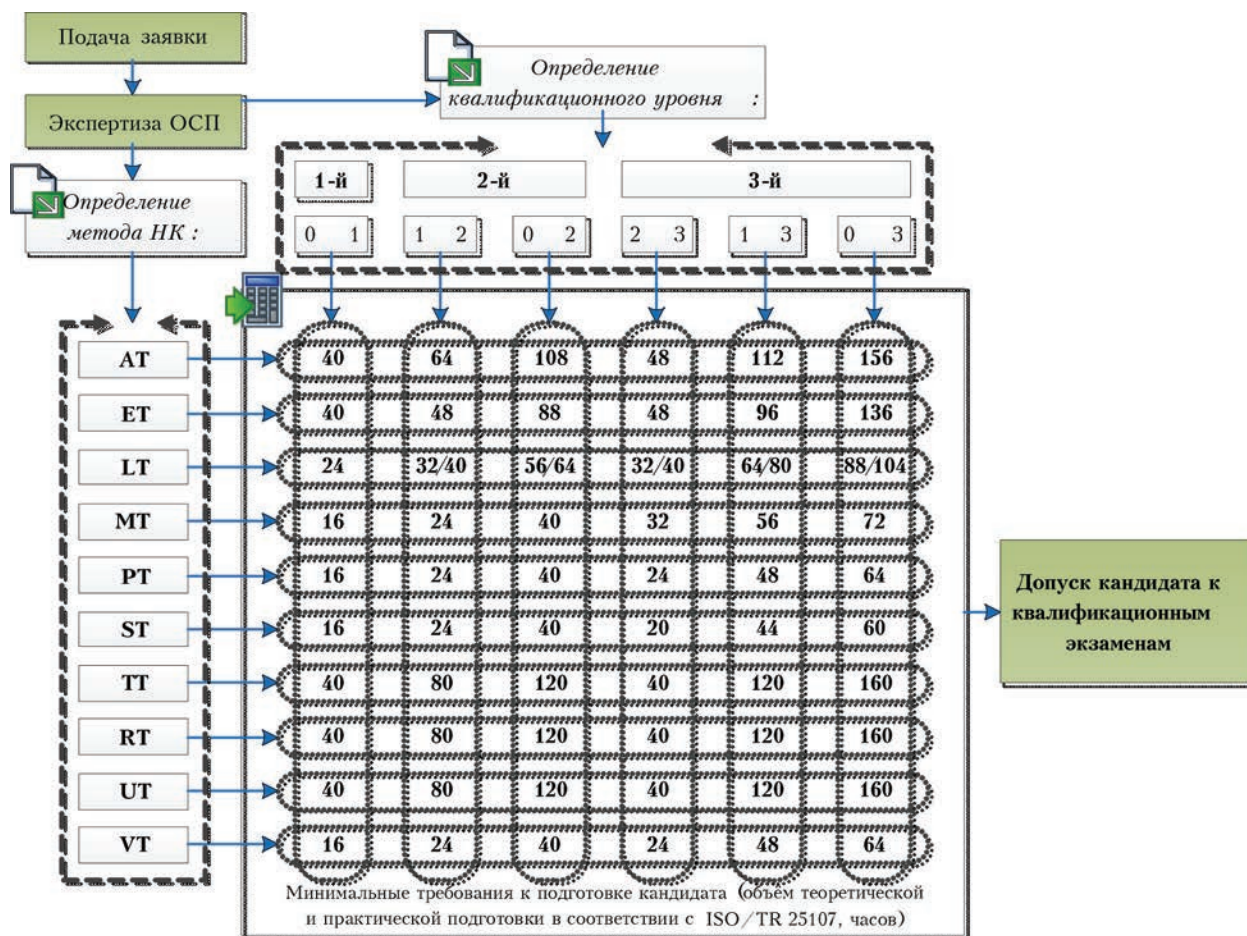


Рис. 1. Минимальный объем теоретической и практической подготовки кандидата

подготовки по различным методам НК дублируются по определенным дисциплинам. При этом общее количество часов подготовки может быть уменьшено.

2. Кандидаты, закончившие технический колледж или университет по соответствующей специальности, или кандидаты, которые закончили не менее двух курсов инженерных наук в техническом колледже или университете. Уменьшение объема подготовки применимо к тем специальностям, которые тематически близки к методу НК (математика, химия, физика) и/или к

сектору продукции или производственному (химия, металлургия, инжиниринг и т.д.).

3. Кандидаты проходят процедуру сертификации на 1- или 2-й квалификационный уровень, при этом область их сертификации ограничена в применении (например, автоматизированный контроль труб, проката, ультразвуковая толщинометрия и т.п.) или техникой (например, RT контроль только с использованием радиоскопии и т.п.).

4. Кандидаты проходят процедуру сертификации для прямого доступа на 2-й уровень по RT ме-

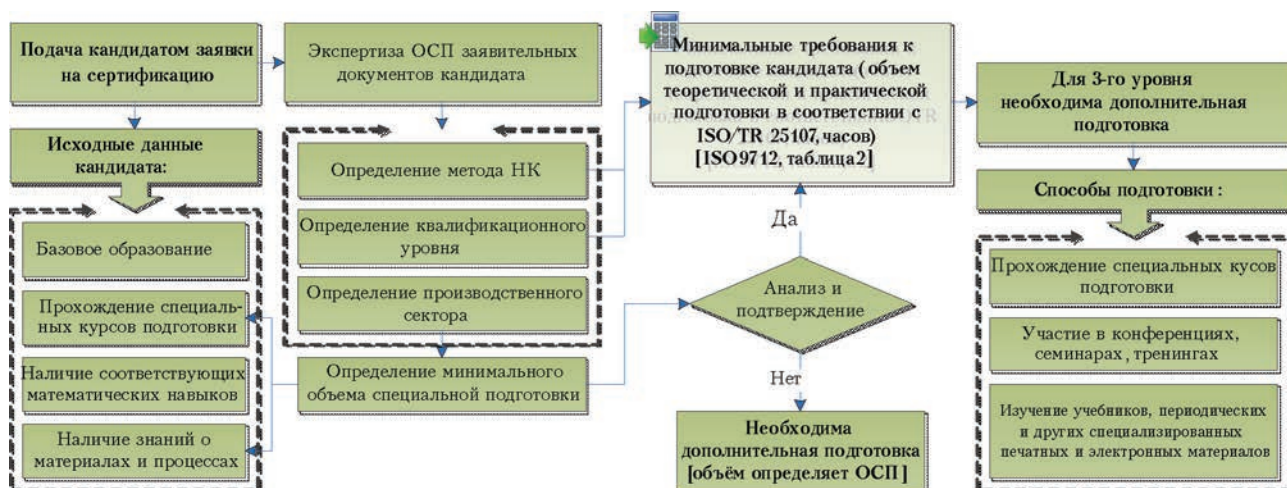


Рис. 2. Факторы, предусматривающие увеличение объема подготовки кандидата на сертификацию



Рис. 3. Условия, при которых допускается снижение объема подготовки кандидата на сертификацию

туду. Уменьшение объема подготовки применимо в том случае, если сертификация ограничена расшифровкой снимков и только в одном секторе продукции. При этом общее количество часов подготовки может быть не менее 56 ч.

В любом случае при использовании нескольких условий для уменьшения продолжительности подготовки общее уменьшение не должно быть более чем на 50 % длительности обучения согласно требованиям стандарта ISO 9712.

Как видно из приведенных рисунков, подготовка кандидата может проходить по различным алгоритмам. Факторы, влияющие на выбор алгоритма подготовки, достаточно разнообразны, но в основном зависят от уровня базовой подготовки кандидата и его профессиональной интегрированности в сферу неразрушающего контроля.

Обращает на себя внимание и тот факт, что стандарт ISO 9712 в его нынешней редакции не предусматривает проведение подготовки в виде так называемого дистанционного обучения, акцентируя внимание именно на «курсовой форме» проведения подготовки.

Связано это, прежде всего, с тем фактом, что подготовка, которая должна быть основана на программах, соответствующих стандарту ISO/TR 25107, представляет собой курс как теоретической, так и практической подготовки, провести который дистанционно не представляется возможным. В то же время дополнительная подготовка кандидата

(если в ней есть необходимость), может быть вполне успешно проведена и в форме так называемой дистанционной подготовки (рис. 3).

В заключение хотелось бы обратить внимание как кандидатов на сертификацию, так и специалистов ОСП по НК на достаточно широкий спектр возможных алгоритмов проведения подготовки кандидатов, предоставляемых стандартом ISO 9712. Более глубокий анализ документов кандидата при проведении экспертизы (при необходимости проведение его анкетирования по ключевым критериям оценивания образовательного уровня) позволит максимально эффективно и гибко выполнить данный этап в процессе сертификации кандидата.

1. ISO 9712: 2012 Non-destructive testing - Qualification and certification of NDT personnel / Standard by International Organization for Standardization / Fourth edition / 01-Jul-2012 / 31 p. Неразрушающий контроль. Квалификация и сертификация персонала в области неразрушающего контроля / Стандарт ИСО / 4-я ред. / 15.06.2012 г. / 31 с.
2. ISO/TR 25107: 2006 Non-destructive testing - Guidelines for NDT training syllabuses / Standard by International Organization for Standardization (Technical Report) / 01-Jul-2006 / 78 p. Неразрушающий контроль. Руководство по программам подготовки в области НК / Стандарт ИСО / 01.07.2006 / 78 с.
3. ISO/TR 25108: 2006 Non-destructive testing - Guidelines for NDT personnel training organizations / Standard by International Organization for Standardization (Technical Report) / 01-Jul-2006 / 18 p. Неразрушающий контроль. Руководство по организациям, проводящим подготовку персонала по неразрушающему контролю / Стандарт ИСО / 01.07.2006 / 18 с.

Analysis of requirements of International Standard ISO 9712:2012 to the procedure of training a candidate before qualification examinations has been performed. Possible training algorithms are considered, allowing for candidate's initial training level, and specifics of performed production tasks on NDT. 3 References, 3 Figures.

Keywords : non-destructive testing, candidate training algorithm, special training course

Поступила в редакцию
31.05.2016



X ВСЕУКРАЇНСЬКИЙ ФЕСТИВАЛЬ НАУКИ*

19–21 травня 2016 р. в рамках X Всеукраїнського фестивалю науки по всій Україні відбулося понад тисячу різноманітних за формою та змістом заходів, спрямованих на інформування суспільства про наукову діяльність і здобутки українських учених. 19 травня 2016 р. у приміщенні Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України відбулося урочисте відкриття X Всеукраїнського фестивалю науки, який уже за традицією проходить напередодні святкування Дня науки. Науково-поляризаційні заходи до професійного свята українських учених розпочалися ще 14 травня 2016 р. з всеукраїнської акції «Дні науки. Весна – 2016», ініціаторами й організаторами якої вже третій рік поспіль є молоді вчені з академічних інститутів.

Фестиваль науки — це масштабний загальнодержавний проект з популяризації науки в суспільстві, засновником якого в 2007 р. була Національна академія наук України. Організаторами Фестивалю є також Міністерство освіти і науки України, Міністерство молоді та спорту України, Національний центр «Мала академія наук України», Національна академія медичних наук України, Національна академія педагогічних наук України, Національна академія аграрних наук

України, Національна академія правових наук України, Національна академія мистецтв України, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». Головні партнери заходу — Посольство Французької Республіки в Україні, Французький культурний центр, Інститут Франції.

Програма цього річного Фестивалю, що тривав з 19 по 21 травня, охоплює понад 1000 різноманітних заходів по всій Україні — у столиці, в усіх обласних і районних центрах і навіть деяких селах (адже Національна академія аграрних наук України має багато дослідних станцій саме в сільській місцевості). Заходи були спрямовані на різні категорії учасників: дні відкритих дверей в академічних установах і вищих навчальних закладах, виступи провідних вітчизняних і зарубіжних учених з популярними лекціями, екскурсії до лабораторій і музеїв, круглі столи, виставки, презентації інноваційних розробок, демонстрації науково-популярних фільмів, інтерактивні фізичні шоу, наукові пікніки, зелені лабораторії, наукові кафе тощо.

Урочистому відкриттю Фестивалю науки передувала прес-конференція, в якій взяли участь пер-



Прес-конференція з нагоди відкриття X Всеукраїнського фестивалю науки. Зліва направо: віце-президент НАПН України академік НАПН України А. М. Гуржій, аташе з питань наукового та університетського співробітництва Посольства Французької Республіки в Україні пан Сильван Ріголе, перший віце-президент НАН України академік НАН України А. Г. Наумовець, директор київської спеціалізованої школи № 49 з поглибленим вивченням французької мови А. О. Сулейманова, учений секретар Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України кандидат технічних наук І. М. Клочков

*По матеріалах публікації в журналі «Вісник» Національної академії наук України, № 6, 2016 р.



Виступ Надзвичайного і Повноважного Посла Французької Республіки в Україні пані Ізабель Дюмон під час урочистого відкриття X Всеукраїнського фестивалю науки. Ліворуч — перший віце-президент НАН України академік НАН України А. Г. Наумовець, праворуч — заступник міністра освіти і науки України М. В. Стріха

ший віце-президент Національної академії наук України академік НАН України А. Г. Наумовець, віце-президент Національної академії педагогічних наук України академік НАПН України А. М. Гуржій, аташе з питань наукового та університетського співробітництва Посольства Французької Республіки в Україні пан Сильван Ріголе, учений секретар Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України кандидат технічних наук І. М. Ключков, директор київської спеціалізованої школи № 49 з поглибленим вивченням французької мови А. О. Сулейманова, академіки-секретарі відділень НАН України.

Відкриваючи X Всеукраїнський фестиваль науки, перший віце-президент НАН України академік А. Г. Наумовець зазначив, що цей захід, з одного боку, сприяє популяризації в суспільстві наукової діяльності українських учених, а з іншого є своєрідним звітом науковців перед громадянами своєї країни — платниками податків про те, яких результатів було досягнуто і яку практичну користь вони можуть мати. Однак дуже важливо, що в Україні, як і в багатьох інших країнах світу, де реалізується цей проект, фестивалі науки орієнтовані насамперед на молодь: студентів, школярів і навіть дітей молодшого віку, для яких передбачено багато цікавих і захоплюючих заходів. У такий спосіб фестиваль сприяє формуванню інтелекту, стимулює інтерес до пізнання світу, підвищує авторитет науки і науковців.

Академік А. Г. Наумовець зачитав привітання президента НАН України академіка Б. Є. Патона учасникам X Всеукраїнського фестивалю науки.

Проведення Всеукраїнського фестивалю науки вже стало доброю традицією. З кожним роком кількість учасників фестивалю зростає. Це свідчить про те, що головна наша мета — популяризувати науку в суспільстві, залучити до досліджень талановиту молодь, допомогти їй визначитися з вибором майбутньої професії — виконується успішно.

Я дуже радий, що дедалі більше молодих людей бере участь у заходах Фестивалю. Це означає, що молодь тягнеться до знань. Бажаю їм зберегти це захоплення на все життя.

Це особливо важливо сьогодні, коли українська наукова спільнота б'є на сполох, намагаючись повернути увагу суспільства і насамперед влади до потреб науки. Прогрес держави, суспільства, окремої людини неможливий без знань і інтелекту. Стан розвитку науки і технологій визначає економічне місце держави і є запорукою процвітання у су-



Радник генерального директора Європейської організації з ядерних досліджень (ЦЕРН) Крістоф Шефер



Лекція доктора біологічних наук Тетяни Сергєєвої

часному глобалізованому світі. Нерозуміння цього може призвести до остаточної руйнації інтелектуального і наукового потенціалу держави і, як наслідок, позбавити Україну можливості бути конкурентоспроможною державою на світовій арені.

Сьогодні на урочистому відкритті Фестивалю ми об'єднали під одним дахом академіків і молодих учених, талановиту учнівську і юнацьку молодь, представників влади, бізнесу та громадських організацій. Отже, сьогодні нас об'єднує наука, і так має бути й у повсякденному житті. Ми маємо поєднати наші зусилля і зробити все можливе для того, щоб Україна посіла гідне місце серед держав світу.

У день відкриття X Всеукраїнського фестивалю науки я висловлюю тверде сподівання, що високий науковий професіоналізм, талант і цілеспрямованість української молоді, досвід та відданість справі наших учених, їх велике бажання працювати задля поліпшення життя людей стануть потужною рушійною силою розвитку нашої держави.

Я щиро дякую всім, хто взяв участь в організації цього свята. Світ знань не має меж, і перемоги вчених були і ще будуть предметом нашої національної гордості.

Під час урочистого відкриття Фестивалю з промовами виступили також віце-президент Національної академії педагогічних наук України академік НАПН України А. М. Гуржій, заступник міністра освіти і науки України М. В. Стріха, Надзвичайний і Повноважний Посол Французької Республіки в Україні пані Ізабель Дюмон і науковий керівник Інституту сцинтиляційних матеріалів НАН України академік Б. В. Гриньов.

Присутні на урочистому відкритті Фестивалю мали змогу послухати науково-популярні лекції. Радник генерального директора Європейської організації з ядерних досліджень (CERN) Крістоф Шефер виступив з лекцією «Розсекречення космічного коду», в якій яскраво і захопливо розповів про основні напрями діяльності і завдання CERN, а старший науковий співробітник Інституту мо-



Перев'язувальні матеріали на основі радіаційно зшитих гідрогелів (Інститут фізики НАН України)

лекулярної біології і генетики НАН України доктор біологічних наук Т.А. Сергєєва під час лекції «Біосенсиори — з'єднання живого з неживим» поінформувала слухачів про світові та вітчизняні здобутки в галузі створення біосенсорів.

Потім відвідувачі ознайомилися з виставкою-презентацією прикладних наукових досягнень установ НАН України. Цього року на ній було представлено 473 науково-технічні розробки 50 академічних інститутів, які вже впроваджені або можуть бути найближчим часом впроваджені у виробництво. З повним переліком продемонстрованих розробок можна ознайомитися за посиланням: http://www.nas.gov.ua/text/pdfNews/SCIENCE_FEST_2016_exposition_list.pdf.

Вражає широкий спектр потенційних застосовань пропонованих співробітниками НАН України розробок — від сфери медицини та охорони здоров'я до оборонно-промислового комплексу країни. І не вина вчених у тому, що лише невелика частка їхніх практичних наукових досягнень втілюється в життя. Упродовж останніх років, попри те, що наявний у нашій країні вагомий науково-технічний потенціал, переважну частину українського експорту становить необроблена сировина і продукція з мінімальною доданою вартістю та низьким рівнем технологічності, а отже, ані державні, ані приватні підприємства не зацікавлені у впровадженні інноваційних розробок і технологій та виробництві наукоємної продукції. Змінити цю ситуацію на краще можна лише за допомогою цілеспрямованої державної політики і завдяки створенню в країні сприятливих умов для розвитку малого та середнього бізнесу.

XI Всеукраїнський фестиваль науки зацікавив не тільки працівників НАН України, а також усіх, хто займається наукою та впровадженням її досягнень в практику.

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ОРГАНИЗАЦИИ СИСТЕМЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И МОНИТОРИНГА НА ПАО «УКРЗАЛІЗНИЦЯ»

В отраслях промышленности с большим объемом применения неразрушающего контроля (металлургия, энергетика и др.) проблемами диагностики занимаются ЦЗЛ, ОТК и другие подразделения этих производств. Ни одна сторонняя организация, будь-то НИИ или фирма, производящая средства контроля, не может знать всех тонкостей, особенностей технологических процессов на железнодорожном транспорте, поэтому и не может быть головной организацией для ПАО «Укрзалізниця». Надо попытаться создать такой департамент (агентство) внутри, в структуре ПАО «Укрзалізниця».

Департамент «Неразрушающего контроля и мониторинга» (НКМ) должен быть с развитой собственной структурой и независимым от руководства других отделений. Надеюсь, эти мои пожелания потомственного железнодорожника и специалиста в области НК услышит руководство ПАО «Укрзалізниця». Такое решение расширит возможности в выборе поставщиков диагностического оборудования, так как методов и средств НК намного больше, чем на данное время предлагается в Украине фирмами, сотрудничающими с ПАО «Укрзалізниця».

В сложившейся ситуации в Украине с реорганизацией промышленности надо попытаться организовать систему неразрушающего контроля и мониторинга (СНКМ) объектов железнодорожного транспорта, которая будет соответствовать европейским нормам. Организация НК по-европейски не исключает сложившихся традиционных отношений с железными дорогами других государств. Географическое положение и активная модернизация промышленности Украины окажет положительное влияние на состояние НК железных дорог в соседних странах. При правильной организации такого департамента они со временем будут перенимать наш опыт СНКМ для своих железных дорог. Надо стараться максимально приблизиться в этом вопросе к организации НК в Европейском Союзе и США.

Первое, с чего надо начать – найти патриотически настроенных специалистов НК III-го уровня квалификации, желающих организовать систему СНКМ «Укрзалізниця». Создание европейской

системы НК снизит аварийность на железнодорожном транспорте.

Ниже будет изложена версия организации такой системы как одного из условий средства понижения аварий на железнодорожном транспорте. Из 15...20 причин аварий на железнодорожном транспорте по разным данным на человеческий фактор и некачественный НК приходится до 20 %. Поэтому первым условием успеха системы СНКМ является наличие профессиональных кадров по НК. В Украине достаточно много специалистов III-го уровня квалификации, которые способны разработать основы для СНКМ «Укрзалізниця». Практически все они объединены в Украинском обществе НКТД.

Вторым условием является требование, чтобы основные службы ПАО «Укрзалізниця» имели собственные независимые подразделения НК, которые должны возглавлять специалисты III-го уровня квалификации, имеющие практический опыт работы по НК на железнодорожном транспорте.

В зависимости от функций этой службы ее подразделение НК будет иметь свою специфику. Так, НК-подразделения службы пути не будут похожи на подразделения НК пассажирской службы или на НК-подразделения службы контактных сетей и т.п. Независимых подразделений НК должно быть много, не меньше чем самих служб. Итак, второе основополагающее требование к СНКМ – все службы имеют собственные независимые подразделения НК.

На первом организационном этапе формирования системы СНКМ подразделения НК могут совмещать функции НК родственных служб. Например, НК и мониторинг состояния вспомогательных объектов (мостовых переходов, зданий, сосудов и др.) могут временно быть отнесены к компетенции наиболее развитого подразделения какой-либо службы НК данного отделения ПАО «Укрзалізниця». В другом ее отделении эти обязанности могут быть отнесены к иной службе, где есть хорошо организованные подразделения НК.

Таким образом, все объекты (а не только подвижной состав и железнодорожные пути) ПАО «Укрзалізниця» будут периодически проверяться профессионалами в области НК.

Третьим условием эффективной системы

СНКМ является периодическая аттестация персонала НК в региональных центрах (АЦНК), которых в Украине достаточно много. В этом отношении необходимо использовать международный опыт, а так же опыт УО НКТД.

При составлении программ обучения и аттестации персонала, применяющего на железнодорожном транспорте НК, должны быть учтены стандарты ISO 9712, СТТУ и нормативные документы ПАО «Укрзалізниця». Кроме того, надо использовать материалы Европейских федераций по НК и мониторингу. Важно в учебных материалах и программах учесть опыт и нормативные документы соседних государств. Ориентация на аттестацию через УО НКТД, которое является членом Европейской федерации по НК и Европейской федерации по мониторингу, обеспечит высокий уровень знаний, получение документов, признаваемых в сопредельных государствах.

В информационных бюллетенях «НК-информ» №№ 3 и 4 за 2015 г. подробно описаны процедуры и опыт работ УО НКТД в части сертификации персонала по европейским и американским правилам. Желательно, чтобы директором департамента (агентства) «НКМ-Укрзалізниця» был выпускник кафедры НК железнодорожного вуза. В этом департаменте должны работать специалисты с высшим образованием по НК, аттестованные по основным видам НК, применяемым на железнодорожном транспорте.

Департаменту НКМ функционально должны подчиняться подразделения НК всех служб «Укрзалізниця», а департамент должен быть в прямом подчинении только у руководства железной дороги.

Основными функциями департамента НКМ «Укрзалізниця» должны быть:

- надзор за профессиональной, квалификационной деятельностью подразделений НК в службах;
- организация периодической аттестации всего персонала по НК ПАО «Укрзалізниця»;

- создание совместно с УО НКТД для учебных и аттестационных центров программ обучения, учебных образцов с дефектами, подлежащими обнаружению;

- предоставление письменного разрешения на начало деятельности специалистов и проверка результатов работы по НК;

- создание и поддержание парка дефектоскопической техники и обязательных стандартных образцов, по которым настраивается дефектоскопическая аппаратура;

- профилирование, ориентация отдельных учебных центров и АЦНК на соответствующие службы ПАО «Укрзалізниця»;

- взаимодействие с учебными центрами производителей дефектоскопического оборудования, например, как в Ассоциации ОКО, ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины;

- способствовать внедрению новой техники НК;

- обеспечение подготовки персонала и правильное применение основных методов НК;

- требовать совершенствования методов и средств НК у разработчиков дефектоскопического оборудования для железнодорожного транспорта;

- осваивать и внедрять европейские нормы мониторинга и сервиса всей техники, эксплуатируемой «Укрзалізницею»;

- поддерживать деловые контакты с УО НКТД, РОНКТД, EFNDT, Федерацией мониторинга Европы и другими научно-техническими обществами;

- добиться создания полигона технических средств, разрабатываемых для железнодорожного транспорта, разработать его устав.

Украинское общество НКТД готово на безвозмездной основе помочь ПАО «Укрзалізниця» создать современную систему НК и мониторинга, которую, я уверен, будут использовать железные дороги сопредельных государств, включая опыт организации департамента НКМ.

*В. А. Троцкий
ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины*

ВСЕУКРАЇНСЬКА КОНФЕРЕНЦІЯ

«СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ ЗВАРЮВАННЯ ТА СПОРІДНЕНИХ ТЕХНОЛОГІЙ.

УДОСКОНАЛЕННЯ ПІДГОТОВКИ КАДРІВ»

7–9 вересня 2016 р.

м. Маріуполь

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет (ПДТУ).

87500, м. Маріуполь, Донецька обл., Україна, вул. Університетська 7.

Тел.: (380) 629 44 65 91; (380) 629 44 62 16

E-mail: pstu.edu.oitzv@gmail.com

ОСОБЕННОСТИ ОБСЛЕДОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ВЫСОТНЫХ СООРУЖЕНИЙ ПРИ ИХ РЕКОНСТРУКЦИИ

Особенностью реконструкции металлических конструкций (МК) высотных сооружений является выполнение работ в условиях действующего предприятия, что снижает производительность труда специалистов, проводящих обследование, на 25...30 % по сравнению с новым строительством.

Технические решения по проектированию реконструкции должны базироваться на результатах обследования конструкций, которое проводится с целью оценки их технического состояния, условий эксплуатации, выявления аварийного состояния элементов конструкций, разработки мероприятий по их устранению и технического заключения о возможности дальнейшей эксплуатации сооружения в целом.

Самыми повреждаемыми конструкциями каркасов высотных сооружений являются фермы и связи. Характерными повреждениями, отражающимися на эксплуатационной пригодности, являются:

- разрывы несущих элементов или их отрыв в соединениях;
- трещины в основном металле или сварных швах

в зонах повышенной концентрации напряжений;

- искривления элементов конструкций более допустимых величин;
- разрушение защитных покрытий и коррозия металла и др.

Для выявления причин возникновения недопустимых дефектов и повреждений конструкций в ООО НПО «Дискрет» проводится анализ результатов инструментальных обследований и проверочный расчет с целью предупреждения аварийных ситуаций.

Для выявления дефектов и повреждений используется ряд методов и практических навыков.

В условиях отсутствия (зачастую) технической документации очень важно установление фактических толщин элементов, их сечений, вскрытие мест повреждения коррозией и др. (а, б, в). Определение свойств использованных в конструкциях сталей с помощью образцов, вырезанных из конструкций, выполняется современными методами (г, д, е). В труднодоступных местах используются возможности промышленного альпинизма (ж).



Выявление дефектных элементов конструкций (а–ж) на этапе инструментального обследования: 1 – разрыв несущего элемента; 2 – скрытая коррозия элементов; 3 – марка стали не соответствует требованиям действующих норм проектирования

Ю. Н. Блинов, Е. С. Завальный, Е. И. Ливончик
ООО НПО «Дискрет»
E-mail: nvodiscret@gmail.com

IV Международная научно-техническая конференция «СВАРКА И РОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ: ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ»

4–7 октября 2016 г.

г. Краматорск

УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

Донбасская государственная машиностроительная академия (ДГМА) проводит

IV Международную научно-техническую конференцию

«Сварка и родственные технологии: перспективы развития».

НАПРАВЛЕНИЯ РАБОТЫ КОНФЕРЕНЦИИ

- ◆ Прогрессивные технологии сварки, наплавки, пайки, резки, нанесения покрытий и обработки поверхностей
- ◆ Математическое, физическое, имитационное моделирование, компьютерные и информационные технологии в сварке и родственных процессах
- ◆ Теория процессов сварки и наплавки
- ◆ Физико-химические процессы при сварке и родственных процессах
- ◆ Материаловедение в сварке и родственных процессах
- ◆ Перспективные конструкционные, сварочные и наплавочные материалы
- ◆ Механизация и автоматизация в сварке и родственных процессах
- ◆ Оборудование и источники питания в сварке и родственных процессах
- ◆ Ресурс и надежность сварных конструкций
- ◆ Техническая диагностика и контроль качества в сварке и родственных технологиях
- ◆ Энерго- и ресурсосбережение в сварке и родственных технологиях
- ◆ Экологические проблемы процессов сварки и наплавки
- ◆ Нормативная база сварочного производства
- ◆ Сварочные и родственные технологии в медицине
- ◆ Нанотехнологии, наноматериалы в сварочных и родственных процессах
- ◆ Нейросетевые технологии в сварочных и родственных процессах
- ◆ Подготовка и повышение квалификации кадров для сварочного производства и смежных областей
- ◆ История развития сварки и родственных процессов

Контакты: Донбасская государственная машиностроительная академия (ДГМА), ул. Шкадинова, 72, 84313, г. Краматорск, Донецкая обл., Украина, факс: (+38-0626) 41-63-15. E-mail: sp@dgma.donetsk.ua; goldenmih@ukr.net; www.dgma.donetsk.ua

8-а Національна науково-технічна конференція і виставка

Неруйнівний контроль та технічна діагностика

Україна, Київ, 22-24 листопада 2016

ІЕЗ ім. Є.О.Патона НАН України
Міжнародний виставковий центр

Основні теми конференції:

- методи неруйнівного контролю (ультразвуковий, радіаційний, магнітний, вихрострумний, акустико-емісійний, тепловий, оптичний, вібродіагностичний, контроль проникаючими речовинами);
- моніторинг технічного стану і оцінка залишкового ресурсу об'єктів підвищеної небезпеки при експлуатації;
- НКТД на залізничному транспорті, в авіації, в тепловій і атомній енергетиці, в нафтогазовій галузі;
- стандартизація, підготовка і сертифікація персоналу



Оргкомітет:

Українське товариство неруйнівного контролю і технічної діагностики

03150, м. Київ-150, а/с 187, УТ НКТД

Тел.: (+380 44) 200-46-66, 205-22-49, 200-81-40

Факс: (+380 44) 205-31-66

E-mail: usndt@ukr.net | www.usndt.com.ua



Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики

Інститут електросварювання ім. Є.О.Патона
Національної академії наук України

Міжнародний виставковий центр

Міжнародний комітет
з неруйнівного контролюЄвропейська федерація
з неруйнівного контролюМіжнародне товариство
з моніторингу стану

Інформаційна підтримка:



Бюлетень УТ НКТД "НК-Інформ"

Журнал "Техническая диагностика
и неразрушающий контроль"

Журнал "Автоматическая сварка"

Журнал "Методы та прилади
контролю якості"Інформаційний портал
www.usndt.com.ua

ПОДПИСКА — 2016

на журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»

Украина		Россия		Страны дальнего зарубежья	
на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
240 грн.	480 грн.	1800 руб.	3600 руб.	30 дол. США	60 дол. США

В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.



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

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

Правила для авторов: www.patonpublishinghouse.com/rus/journals/tdnk/rules
Лицензионное соглашение: www.patonpublishinghouse.com/rus/journals/tdnk/license
В 2016 г. в открытом доступе архивы статей журнала за 2003–2014 гг.

РЕКЛАМА в журнале «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»

Реклама публикуется на обложках и внутренних вклейках следующих размеров

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

- В рекламных макетах, для текста, логотипов и других элементов необходимо отступать от края модуля на 5 мм с целью избежания потери части информации. Все файлы в формате IBM PC

- Corell Draw, версия до 10.0
- Adobe Photoshop, версия до 7.0
- QuarkXPress, версия до 7.0

- Изображения в формате TIFF, цветовая модель CMYK, разрешение 300 dpi

Стоимость рекламы и оплата

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

- Оплата в гривнях или рублях РФ по официальному курсу

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

- Для постоянных партнеров предусмотрена система скидок

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

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

- Ответственность за содержание рекламных материалов несет рекламодатель

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

Подписано к печати 2.08.2016. 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.