Международный научно-технический и производственный журнал

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

№ 4, 2016

Издается с 1989 г.
Выходит 4 раза в год

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор
Б. Е. ПАТОН

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

В. А. Стрыжало
Ин-т проблем прочности, Киев, Украина

Н. П. Алешин
МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, РФ
В. Л. Венгринович
Ин-т техн. физики, Минск, Республика Беларусь
М. Л. Казакевич
Ин-т физической химии, Киев, Украина
О. М. Карпаш
Ив.-Франк. нац. техн. ун-т нефти и газа, Украина
В. В. Клюев
ЗАО НИИИН МНПО «Спектр», Москва, РФ
З. Т. Назарчук, В. Н. Учанин
Физ.-мех. ин-т, Львов, Украина
Н. В. Новиков
Ин-т сверхтвердых материалов, Киев, Украина
Г. И. Прокопенко
Ин-т металлофизики, Киев, Украина
В. А. Стороженко
Харьков. нац. ун-т радиоэлектроники, Украина
С. К. 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

Научный редактор
Е. А. Давыдов
Редакторы
Л. Н. Герасименко, Д. И. Середа, Т. В. Юштина

Свидетельство
о государственной регистрации
КВ4787 от 09.01.2001.
Журнал входит в перечень
утвержденных МОН Украины
изданий для публикации трудов
соискателей ученых степеней

СОДЕРЖАНИЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

ЛОБАНОВ Л. М., ПИВТОРАК В. А., КРОТЕНКО П. Д., НЕХОТЯЩИЙ В. А, ШИЯН К. В. Прогнозирование разрушающего давления трубы с внутренним поверхностным дефектом с применением методов лазерной интерферометрии 3

НЕДОСЕКА А. Я., НЕДОСЕКА С. А., МАРКАШОВА Л. И., КУШНАРЕВА О. С. О распознавании изменений структуры материалов при разрушении по данным акустической эмиссии 9

ВЕЛИКОИВАНЕНКО Е. А., МИЛЕНИН А. С., РОЗЫНКА Г. Ф., ПИВТОРАК Н. И. Моделирование процессов зарождения и развития докритической поврежденности металла сварных трубопроводных элементов при малоцикловом нагружении..... 14

УЧАНІН В. М., СИДОРЕНКО М. В. Дослідження вихрострумових методів виявлення та оцінки змін структури під час шліфування виробів із теплостійкої сталі ВКС-5..... 21

ДМИТРАХ І. М., СИРОТЮК А. М., БІЛИЙ О. Л., БАРНА Р. А., ЛУТИЦЬКИЙ О. Л. Експертна система для моніторингу технічного стану та оцінки ризику руйнування наземних ділянок тривало експлуатованих газопроводів..... 27

ЗВІРКО О. І. Використання електрохімічних підходів для оцінювання експлуатаційної деградації конструкційних сталей 34

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

КРИВОРУЧКО В. Т., НАВАЛЬНЄВ М. І. Інженерний геодезичний моніторинг фундаментів обладнання компресорних станцій..... 40

ПОСИПАЙКО Ю. М. Дефектоскопія в Антарктиці: технічне діагностування резервуара РВС-200 на українській антарктичній станції «Академік Вернадський» 46

КИРИЧОК В. В., ПЕРЕПИЧАЙ А. А., ТОРОП В. М. Особенности использования высоковязких демпферов для повышения сейсмостойкости высокотемпературных фильтров АЭС с реакторами ВВЭР-1000..... 52

СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ

ПОТАП'ЄВСЬКИЙ А. Г., БОНДАРЕНКО Ю. К., ЛОГІНОВА Ю. В., АРТЮХ К. О. Технологічне управління якістю та експлуатаційними властивостями виробів у зварювальному виробництві..... 56

ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ

19-а Всесвітня конференція з неруйнівного контролю 62

ИЗДАНИЕ ПОДДЕРЖИВАЮТ:
Технический комитет по стандартизации «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» ТК-78
Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики

© НАН Украины, ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, МА «Сварка», 2016

International Scientific-Technical and Production Journal

TEKHNICHESKAYA DIAGNOSTIKA i NERAZRUSHAYUSHCHIY KONTROL

№ 4, 2016

Published since 1989
Quarterly issue

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

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

LOBANOV L. M., PIVTORAK V. A., KROTENKO P. D., NEKHOTYASHCHII V. A., SHYAN K. V. Prediction of breaking pressure of a pipe with internal surface defect with application of laser interferometry methods 3

NEDOSEKA A. Ya, NEDOSEKA S. A., MARKASHOVA L. I., KUSHNAREVA O. S. On identification of structural changes in materials at fracture by acoustic emission data 9

VELIKOIVANENKO E. A., MILENIN A. S., ROZYNKA G. F., PIVTORAK N. I. Simulation of processes of initiation and propagation of subcritical damage of metal in welded pipeline elements at low-cycle loading 14

UCHANIN V. M., SIDORENKO M. V. Investigation of eddy current methods of detection and evaluation of structural changes during grinding of items from heat-resistant steel VKS-5..... 21

DMITRAKH I. M., SIROTYUK A. M., BILII O. K., BARNA R. A., LUTITSKII O. L., Expert system for monitoring the technical state and assessment of the risk of failure of ground sections of gas pipelines in long-term operation 27

ZVIRKO O. I. Use of electrochemical methods for evaluation of operational degradation of structural steels..... 34

INDUSTRIAL

KRIVORUCHKO V. T., NAVALNJEV M. I. Engineering geodesic monitoring of compressor station equipment foundations 40

POSYPAIKO Yu. V. Flaw detection in Antarctic. Technical diagnostics of RVS-200 tank in Ukrainian Antarctic station «Academik Vernadskii» 46

KIRICHOK V. V., PEREPICHAI A. A., TOROP V. M. Features of application of high-viscosity dampers to improve the seismic resistance of high-temperature filters in NPP with WWER-1000 reactors..... 52

STANDARDIZATION AND CERTIFICATION

POTAPJEVSKII A. G., BONDARENKO Yu. K., LOGINOVA Yu. V., ARTJUKH K. O. Technological control of quality and service properties of products in welding production..... 56

NEWS AND INFORMATION

19th World Conference on NDT..... 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

© NAS of Ukraine, PWI, International Association «Welding», 2016

УДК 621.19.40

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАЗРУШАЮЩЕГО ДАВЛЕНИЯ ТРУБЫ С ВНУТРЕННИМ ПОВЕРХНОСТНЫМ ДЕФЕКТОМ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ ЛАЗЕРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Л. М. ЛОБАНОВ, В. А. ПИВТОРАК, П. Д. КРОТЕНКО, В. А. НЕХОТЯЩИЙ, К. В. ШИЯН
ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Определены с помощью бесконтактных методов лазерной интерферометрии (электронной ширографии и спекл-интерферометрии) характерные параметры внутреннего коррозионного дефекта в трубе (протяженность в осевом направлении, толщина стенки), которые позволили получить величину прогнозируемого разрушающего давления. Погрешность прогнозирования разрушающего давления составила δ = 7,6 %. Испытания на разрушение показали, что труба с внутренним поверхностным дефектом круговой формы ($d \approx 27$ мм) выдерживает нагрузку, которая составила 89 % разрушающего давления для трубы без дефекта. Библиогр. 12, рис. 8.

Ключевые слова: электронная ширография, спекл-интерферометрия, коррозионный дефект трубы, разрушающее давление, характерные параметры коррозионного дефекта, деформированное состояние

При эксплуатации сосудов давления, а также трубопроводных систем тепловых и атомных электростанций, наиболее часто встречающимися повреждениями являются несквозные поверхностные дефекты, появление которых в большинстве случаев обусловлено коррозионными повреждениями. На участках контролируемой поверхности коррозионные дефекты имеют меньшую толщину металла по сравнению с бездефектным участком. Влияние утонений, образованных на поверхности цилиндрической оболочки, на ее прочность рассмотрено в работах [1, 2], в которых изучались условия зарождения разрушения, а также была получена эмпирическая формула для прогнозирования величины разрушающего давления цилиндрического сосуда при наличии поверхностного дефекта. Вопросам прочности и ресурса трубопроводов с эрозионно-коррозионным износом, трещиноподобными дефектами посвящены работы [3–6].

Выявление внутренних поверхностных дефектов в трубах, сосудах давления при их нагружении давлением является сложной и трудоемкой задачей. Перспективными методами диагностики таких конструкций являются бесконтактные методы лазерной интерферометрии [7, 8]. Наиболее интенсивное развитие для диагностики элементов тонкостенных конструкций, изготовленных из металлических и неметаллических материалов, получил метод электронной ширографии [9–11].

Целью приведенных в работе исследований является выявление коррозионного повреждения с последующим определением разрушающего давления для трубы с внутренним поверхностным дефектом с использованием данных методов электронной ширографии и спекл-интерферометрии.

При неразрушающем контроле качества элементов конструкций используется компактная ширографическая установка, в комплект которой входит одномодовый лазер для освещения поверхности исследуемого объекта, ширографический интерферометр, формирующий два сдвинутых относительно друг друга изображения, CCD-камера для передачи и записи изображений в компьютер с целью дальнейшей обработки интерференционных полос.

При диагностике качества трубчатых элементов конструкций первоочередной задачей является выявление дефектов, в частности, внутренних поверхностных коррозионных повреждений. Для проведения экспериментальных исследований использовали стальную трубу с заложенным в центральном сечении внутренним поверхностным коррозионным повреждением, близким к круговой форме (рис. 1). Дефект был получен методом электрохимического травления металла. Наружный диаметр трубы 219 мм; длина 890 мм; толщина стенки 4,8 мм; материал сталь 2пс. Размер дефекта в осевом направлении составил 28,5 мм, а в кольцевом 26 мм. Толщина стенки на участке расположения дефекта составляла $h_1 = 1,7$ мм. Отношение толщин равно $k = 1,7/4,8 = 0,35$. К торцам элемента стальной трубы с обеих сторон приваривались днища толщиной 25 мм, к которым подсоединялись шланги для подачи и сброса сжатого воздуха.

Контроль качества трубчатого элемента выполнялся путем освещения лазерным светом с наружной стороны исследуемого участка поверхности

© Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, П. Д. Кротенко, В. А. Нехотящий, К. В. Шиян, 2016

Рис. 1. Внутритрубное коррозионное повреждение, полученное путем электрохимического травления металла

трубы длиной 200 мм, шириной 100 мм. Отраженная световая волна попадала на оптический элемент, который обеспечивал сдвиг изображений поверхности. С помощью CCD-камеры и аналогово-цифрового преобразователя спекл-картина записывалась в память компьютера. Затем трубу нагружали внутренним давлением на величину Δp = = 0,39 МПа. Спекл-картины для двух состояний объекта, до и после нагружения, обрабатывались с использованием метода фазовых шагов для получения информации о распределении производной $\frac{\partial w}{\partial x}$ от нормальной составляющей w вектора перемещения.

Для определения продольного размера (вдоль оси OX (рис. 2)) внутритрубного коррозионного дефекта рассматривалось поведение производной $\frac{\partial w}{\partial x}$ от прогиба поверхности трубы при ее упругом деформировании. Начало системы координат YOX находится на наружной поверхности трубы и совпадает с центром области коррозионного повреждения. Расстояние между экстремумами в точках A и $Б$ (рис. 3) дает величину $d_1 = x_Б - x_A$ = 26,6 мм ($x_Б$, x_A – координаты точек $Б$ и A), что достаточно близко к фактическому осевому размеру дефекта $d_{факт.}$ = 28,5 мм.

Наряду с определением размера d_1 поверхностного дефекта в осевом направлении важным параметром является толщина стенки трубы в месте его нахождения. При разработке методики определения толщины пораженного коррозией участка трубы использовался спекл-интерферометрический прибор Q-300, который позволяет измерять перемещения в плоскости контролируемого участка нагруженной поверхности трубы [7] (см. рис. 2). Область измерения перемещений ограничивалась прямоугольником *2*. При отображении исследуемой поверхности на мониторе компьютера посредством CCD-камеры и аналого-цифрового преобразователя начало декартовой системы координат XOY находилось в центре кадра. Прибор Q-300 (*1*) располагался таким образом, чтобы центр кадра совпадал с пересечением осей симметрии заложенного дефекта, который находился посредине образца на одинаковом расстоянии от его торцов. Труба с внутренним поверхностным дефектом крепилась на виброзащищенной металлической плите, что обеспечивало отсутствие ее перемещений как жесткого целого. Для улучшения диффузного отражения лазерного света от

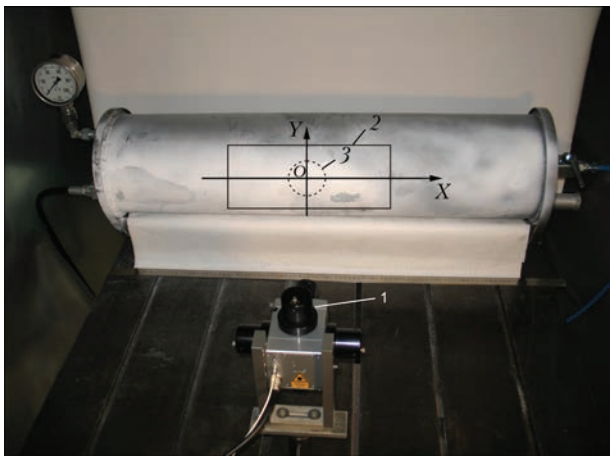


Рис. 2. Общий вид образца трубы с внутритрубным дефектом: *1* – спекл-интерферометрический прибор Q-300; *2* – прямоугольный участок измерения, который охватывает коррозионное повреждение; *3* – граница области внутритрубного коррозионного повреждения

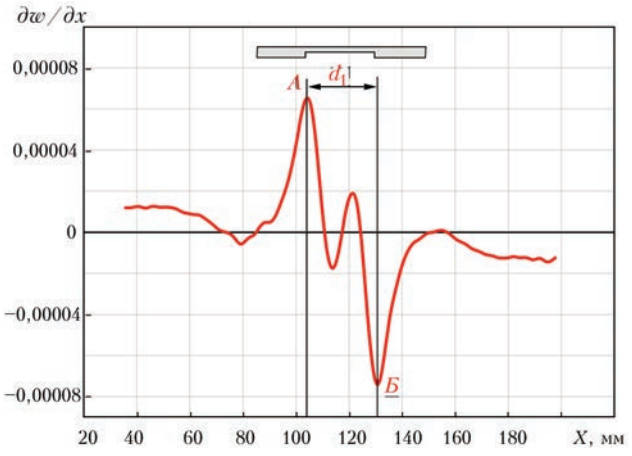


Рис. 3. Изменение производной $\frac{\partial w}{\partial x}$ вдоль оси OX в области дефекта при приращении внутреннего давления на величину Δp = 0,39 МПа (d_1 – размер дефекта)

поверхности контролируемого участка трубы она окрашивалась в белый цвет средством для контроля трещин MR 70. Нагружение трубы внутренним давлением величиной Δp = 0,59 МПа проводилось сжатым воздухом. Плоскостные перемещения v точек поверхности в направлении оси *OY* (см. рис. 2) измерялись на участке расположения коррозионного повреждения. Предварительно, до увеличения внутреннего давления, в память компьютера записывалась спекл-структура (образованная лазерным светом) начального состояния исследуемого участка поверхности трубы. После нагружения спекл-структура деформированного состояния контролируемого участка также записывалась в память компьютера. Компьютерная обработка двух спекл-структур (начального и деформированного состояний исследуемого участка поверхности) позволила получить картины интерференционных полос и определить плоскостные перемещения v в направлении оси *OY*.

Из представления поля окружных перемещений на наружной поверхности трубы на участке с внутренним поверхностным дефектом в виде изолиний следует, что в сечении вдоль оси *OY* с изменением координаты *y* и фиксированном значении *x* перемещения v увеличиваются в большей степени, по сравнению с сечениями, удаленными от границы области коррозионного повреждения (рис. 4). Такой характер деформирования объясняется уменьшением первоначальной толщины стенки трубы в результате локальной коррозии металла.

При разработке расчетно-экспериментальной модели деформирования участка трубы с заложенным коррозионным повреждением исходили из следующих предположений. Заложенный дефект по своей форме близок к несквозному круговому отверстию, а утоненный участок в области дефекта рассматривается как круглая пластинка, которая нагружена равномерно распределенным давлением. При задании граничных условий принимается допущение о свободном опирании пластинки по контуру.

Рассмотрим построение алгоритма определения толщины стенки h_1 трубы в области коррозионного повреждения при ее упругом деформировании посредством приложенного внутреннего давления. Для моделирования деформационного процесса в рассматриваемой области использовалась теория изгиба пластин. При изгибе пластины (утоненного участка) перемещение v в плоскости вдоль оси *OY* в точках, которые находятся на расстоянии *z* от срединной плоскости, определяются соотношением [12]:

$$\mathrm{v} = -z\frac{\partial w}{\partial y},\ -\frac{h_1}{2} \le z \le \frac{h_1}{2}. \qquad (1)$$

Продифференцировав (1) по переменной *y* и использовав соотношение $\varepsilon_y = \frac{\partial \mathrm{v}}{\partial y}$ при $z = \frac{h_1}{2}$ получим:

$$h_1 = -\frac{2\varepsilon_y}{\partial^2 w / \partial y^2}. \qquad (2)$$

Прогиб срединной поверхности свободно опертой круглой пластины определяется уравнением [12]:

$$w = \frac{p}{64D}\left(\left(\frac{d_1}{2}\right)^2 - r^2\right)\left(\frac{5+\nu}{1+\nu}\left(\frac{d_1}{2}\right)^2 - r^2\right), \qquad (3)$$

где $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ – расстояние от центра пластины до точки с координатой (*x*, *y*); d_1 – диаметр пластины (соответствует диаметру поверхностного дефекта круговой формы); $D = \frac{Eh_1^3}{12\left(1-\nu^2\right)}$ – жесткость пластины при изгибе; *E* – модуль упру-

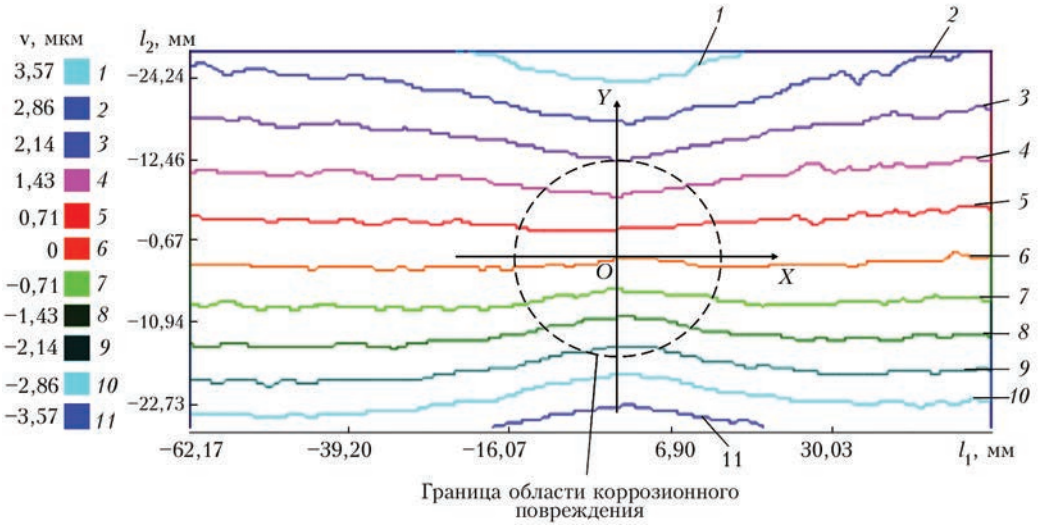


Рис. 4. Линии равных окружных перемещений v в области коррозионного повреждения трубы, мкм: *1* = 3,57; *2* = 2,86; *3* = = 2,14; *4* = 1,43; *5* = 0,71; *6* = 0,00; *7* = –0,71; *8* = –1,43; *9* = –2,14; *10* = –2,86; *11* = –3,57 (l_1, l_2 – размеры области измерения вдоль оси *X* и *Y* соответственно)

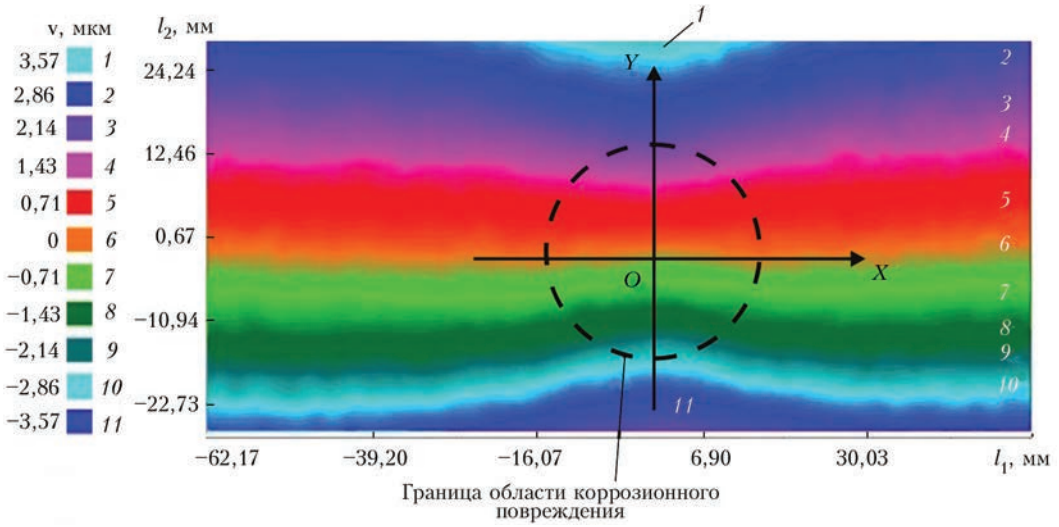


Рис. 5. Поле окружных перемещений v в направлении оси *OY* на внешней поверхности трубы, мкм: *1* = 3,57; *2* = 2,86; *3* = 2,14; *4* = 1,43; *5* = 0,71; *6* = 0,00; *7* = –0,71; *8* = –1,43; *9* = –2,14; *10* = –2,86; *11* = –3,57 (l_1, l_2 – те же, что и на рис. 4)

гости материала; ν – коэффициент Пуассона; p – давление воздуха, равномерно распределенного по поверхности пластины.

Исходя из соотношений (2) и (3) для h_1 и w, а также деформации ε_y, которая получена на основании экспериментально измеренных перемещений v в окружном направлении методом электронной спекл-интерферометрии, разработана методика определения толщины стенки трубы в области коррозионного повреждения. Для получения в формуле (2) максимальных величин деформации ε_y и второй производной $\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$ их значения определяются в точке $x = y = 0$, что позволяет избежать зависимости величины $\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$ от координат (x, y).

При экспериментальном определении окружных перемещений на участке боковой поверхности оболочки их отсчет ведется от неподвижной горизонтальной линии симметрии области измерения *2* (см .рис. 2). Образец располагался таким образом, чтобы начало системы координат, а также место расположения нулевых точек при измерении перемещений v с помощью прибора Q-300 совпадало с центром *O* области коррозионного повреждения. При таком выборе указанных точек их расположение было максимально близко к линии симметрии области измерения. На основании экспериментальных значений перемещений v в зависимости от координаты y вдоль оси *OY* (рис. 5), получено их линейное приближение (рис. 6), которое описывается уравнением:

$$\mathrm{v} = (0{,}148y + A)\cdot 10^{-3}, \text{ где } A = 0{,}118 \text{ мм}. \quad (4)$$

Продифференцировав выражение (4) по y, определим величину деформации $\varepsilon_y = 0{,}148\cdot 10^{-3}$.

При применении соотношения (2) для вычисления толщины пластинки h_1 необходимо также определить вторую производную от прогиба при $x = y = 0$. Исходя из выражения (3), находим:

$$\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}_{|x=y=0} = -\frac{p}{16D}\left(\frac{d_1}{2}\right)^2\left(\frac{3+\nu}{1+\nu}\right). \quad (5)$$

На основании анализа соотношений (2) и (5) получаем выражение для определения толщины h_1:

$$h_1 = \frac{2\varepsilon_y}{\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}_{|x=y=0}} = \sqrt{\frac{3pd_1^2(3+\nu)(1-\nu)}{32E\varepsilon_y}}. \quad (6)$$

С учетом рассматриваемой модели величина h_1 соответствует толщине стенки в области заложенного коррозионного повреждения.

Для применения формулы (6) необходима информация о диаметре пластины (соответствует диаметру поверхностного дефекта круговой формы), который определялся на основании данных метода электронной ширографии и составил d_1 = 26,6 мм. Подставив в выражение (6) диаметр дефекта d_1, а также величины: p = 0,59 МПа; ν = 0,3; E = 200000 МПа; $\varepsilon_y = 0{,}148\cdot 10^{-3}$, получим

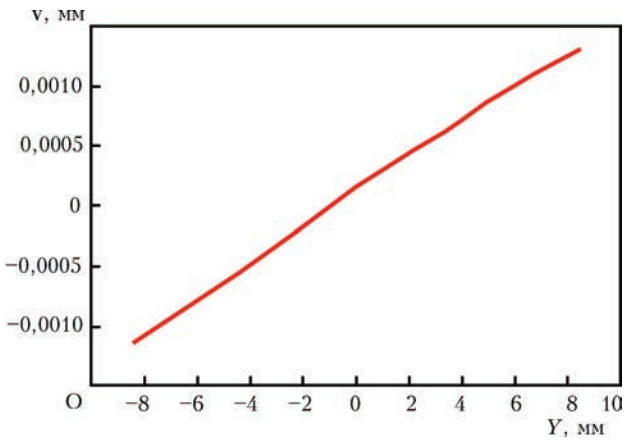


Рис. 6. Зависимость окружных перемещений v от координаты *Y* вдоль оси *OY*

h_1 = 1,762 мм. Фактические параметры рассматриваемого дефекта: протяженность 28,5 мм, толщина стенки 1,7 мм.

Разработанная методика с использованием лазерной интерферометрии позволяет определять диаметр заложенного внутритрубного коррозионного дефекта, близкого к круговой форме, а также толщину стенки трубы в месте коррозионного повреждения (характерные размеры дефекта).

Применение созданной технологии определения характерных размеров внутренних поверхностных дефектов круговой формы (d_1 – диаметра, h_1 – толщины стенки) позволяет прогнозировать величину разрушающего давления в трубах. Для этого использовалась методика, в основе которой лежит гипотеза, что деформированное состояние трубы с внутренним поверхностным дефектом близко к влиянию одиночного сквозного кругового отверстия [1]. Приведение дефекта к сквозному отверстию осуществляется путем приравнивания вдоль оси трубы площади сечения отверстия и той, которая соответствует потерянному металлу в сечении на участке коррозионного повреждения. Расчетная величина разрушающего давления подсчитывается с использованием формулы [1]:

$$P_p^{(\text{расч.})} = \varphi \frac{\sigma_B h}{R_m}, \qquad (7)$$

где $\varphi = \dfrac{2}{\left(d_y \Big/ \sqrt{2R_m h} + 1{,}75 \right)}$; σ_B – предел прочности материала; h – толщина стенки трубы; R_m – радиус срединной поверхности цилиндрической оболочки; d_y – диаметр приведенного сквозного отверстия.

Параметры внутритрубного коррозионного дефекта (d_1, h_1) определяются по данным электронной ширографии и спекл-интерферометрии. Исходя из полученных результатов вычисляется диаметр приведенного отверстия d_y = 16,78 мм. Для расчета по формуле (7) использовали следующие данные: R_m = 107,15 мм; h = 4,8 мм; $\sigma_в$ = 410 МПа. После вычислений получим: $P_p^{(\text{расч.})}$ = 15,85 МПа.

Для оценки влияния коррозионного дефекта на прочность трубы экспериментальным путем было определено значение разрушающего давления. Первоначально испытывалась труба с заложенным внутритрубным коррозионным дефектом, а затем бездефектная. Для измерения внутреннего давления с дискретностью четыре измерения за секунду использовался цифровой датчик «Метран ДИ-100». На рис. 7 представлена кривая, которая показывает изменение давления в образце с коррозионным дефектом от момента его нагружения до разрушения. Анализ показывает, что на участке *АБ* труба деформируется упруго. Дальнейшее увеличение внутреннего давления (P > 14,12 МПа) приводит к упрочнению материала. Металл в области дефекта постепенно теряет способность сопротивляться увеличивающейся величине внутреннего давления. На участке коррозионного повреждения в металле образуется и разрастается трещина, что приводит к разрушению образца (точка *С*, давление $P_{p,1}^{(\text{факт.})}$ = 17,16 МПа). Образовавшаяся трещина в области коррозионного повреждения показана на рис. 8.

Разрушающее давление для стальной трубы с заложенным внутритрубным дефектом с использованием формулы (7) составило $P_p^{(\text{расч.})}$ = = 15,85 МПа. Фактическая прочность трубы определяется величиной $P_{p,1}^{(\text{факт.})}$ = 17,16 МПа. Относительная погрешность прогнозирования величины разрушающего давления равна δ = 7,6 %.

При испытании бездефектной трубы разрушающее давление составило $P_{p,2}^{(\text{факт.})}$ = 19,26 МПа. Следовательно, труба с заложенным внутритрубным коррозионным повреждением выдерживает нагрузку, которая составляет 89 % разруша-

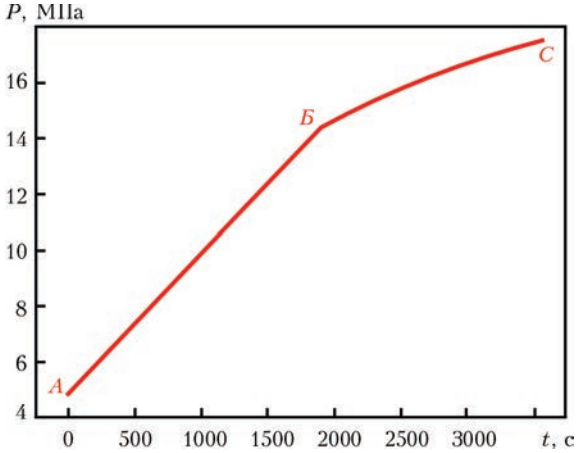


Рис. 7. Изменение во времени давления в трубе с коррозионным повреждением в процессе нагружения

Рис. 8. Разрушение трубы в месте коррозионного повреждения при ее нагружении внутренним давлением

ющего давления для трубы без коррозионного повреждения.

Выводы

На основании данных метода электронной ширографии определена длина внутреннего поверхностного дефекта в трубе.

Разработана расчетно-экспериментальная методика определения толщины стенки внутреннего поверхностного дефекта в трубе с использованием измеренной методом электронной спекл-интерферометрии окружной величины перемещений.

В результате выполненных исследований установлено, что погрешность прогнозирования разрушающего давления составила $\delta = 7{,}6$ %.

Экспериментально обосновано, что труба с внутренним поверхностным дефектом выдерживает нагрузку, которая составляет 89 % разрушающего давления для трубы без дефекта.

1. Гарф Э. Ф. Оценка прочности и ресурса трубопроводов с эрозионно-коррозионными повреждениями / Э. Ф. Гарф, М. А. Нетребский // Автоматическая сварка. – 2000. – № 9–10. – С. 15–20.
2. Раймонд Э. Д. Экспериментальные исследования влияния местных утонений металлов на прочность цилиндрических оболочек / Э. Д. Раймонд, Н. В. Шигано // Проблемы прочности. – 1974. – № 4. – С. 117–120.
3. Великоиваненко Е. А. Моделирование процессов зарождения и развития пор вязкого разрушения в сварных конструкциях / Е. А. Великоиваненко, Г. Ф. Розынка, А. С. Миленин // Автоматическая сварка. – 2013. – № 9. – С. 26–31.
4. Даффи А. О поведении дефектов в сосудах давления / А. Даффи, Р. Эйбер, У. Макси // Новые методы оценки сопротивления металлов хрупкому разрушению: сб. статей под ред. акад. Ю. Н. Работнова. – М. : Мир, 1972. – С. 301–332.
5. Махненко В. И. Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций / В. И. Махненко. – Киев: Наукова думка, 2006. – 618 с.
6. Полянский Р. П. Трубы для нефтяной и газовой промышленности за рубежом / Р. П. Полянский, В. И. Пастернак. – М.: Недра, 1979. – 215 с.
7. Ettemeyer A. Combination of 3-D deformationand shape measurement by electronic speckle-pattern interferometry for quantitative strain-stress analysis / A. Ettemeyer // Optical Engineering. – 2000. – Vol. 39, № 1. – P. 212–215.
8. Rastogi P. K. Digital Speckle Pattern Interferometry and Related Techniques / P. K. Rastogi. – New York, John Wiley & Sons, 2001. – 384 p.
9. Методика, технология и аппаратура ширографического неразрушающего контроля материалов и элементов конструкций / Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, Е. М. Олейник [и др.] // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2004. – № 3. – С. 25–28.
10. Диагностика элементов и узлов конструкций с применением метода электронной ширографии / Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, Е. Н. Савицкая [и др.] // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2008. – №4. – С. 7–13.
11. Лобанов Л. М. Методика определения глубины залегания дефектов в плоских элементах конструкций на основе электронной ширографии / Л. М Лобанов, В. А. Пивторак, П. Д. Кротенко // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2009. – № 3.– С. 5–10.
12. Тимошенко С. П. Пластинки и оболочки: пер. с анг. / С. П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. – М.: Наука, 1963. – 635 с.

Contactless methods of laser interferometry (electron shearography and speckle-interferometry) were used to determine the characteristic parameters of internal corrosion defect in the pipe (extent in the longitudinal direction, wall thickness), which allowed obtaining the magnitude of predicted breaking pressure. Error of breaking pressure prediction was equal to ~ = 7.6 %. Break testing showed that a pipe with inner surface defect of a circular shape (d ~ 27 mm) can stand a load that was equal to 89% of breaking pressure for a sound pipe. 12 References, 8 Figures.

K e y w o r d s : electron shearorgaphy, speckle-interpherometry, corrosion defect, breaking pressure, characteristic parameters of corrosion defect, deformed state

Поступила в редакцию
26.07.2016

УДК 621.19.41

О РАСПОЗНАВАНИИ ИЗМЕНЕНИЙ СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ПО ДАННЫМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

А. Я. НЕДОСЕКА, С. А. НЕДОСЕКА, Л. И. МАРКАШОВА, О. С. КУШНАРЕВА
ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Поставлена задача сопоставления параметров акустической эмиссии тем изменениям структуры, которую она сопровождает. Исследованы некоторые аспекты связи между изменениями микро- и макроструктуры стали 12Х1МФ в процессе развития разрушения. Разработаны методика исследований и конструкция образца, позволяющие эффективно исследовать связи параметров АЭ с изменениями структуры материала на различных стадиях развития разрушения. Полученные при растяжении образца данные АЭ сопоставлены с результатами металлографических исследований. Показано, что параметры акустической эмиссии, возникающей при деформировании материала, могут служить достаточно эффективными характеристиками изменения микро- и макроструктуры материала на различных этапах накопления повреждений и развития разрушения. Библиогр. 15, рис. 5.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, микро- и макроструктура стали, разрушения, металлографические исследования, накопление повреждений

Многочисленные исследования показывают, что при дискретном накоплении повреждений и развитии разрушения возникает акустическая эмиссия (АЭ), характер которой соответствует изменениям структуры материала [1, 2, 4–15]. Одной из важнейших практических задач является сопоставление параметров АЭ тем изменениям структуры, которую она сопровождает.

Дискретность разрушения хорошо подтверждается данными АЭ, получаемыми, в частности, при растяжении образцов. Отметим, что как материал, так и форма образца влияют на регистрируемую акустическую активность. Для поставленной в настоящей работе задаче – поиска подходов к идентификации по данным АЭ структурных особенностей накопления повреждений и разрушения материалов, более подходят такие материалы и конфигурации образцов, которые обеспечивают появление единичных событий АЭ на характерных стадиях деформирования и разрушения, что отмечалось в свое время в работе [6]. В то же время прогнозирование разрушения путем распознавания типовых групп событий АЭ [8] требует использования материалов и образцов с более высокой активностью, которая обеспечивает достаточное количество информации для статистической обработки. Это два различных подхода, и далее в данной работе рассматривается только первый.

Естественно, выявление связи АЭ с достаточно тонкими механизмами развития разрушения представляет собой сложную и комплексную задачу. В данной же работе на примере исследования только одного образца показано, что такая задача может быть принципиально решена. Представленный на рис. 1 график испытаний стали 12Х1МФ, полученный при деформировании образца (рис. 2) с записью АЭ, вполне удовлетворяет поставленной цели. На графике приведены плавная кривая роста нагрузки P (кг) и возникающие в процессе деформирования единичные импульсы АЭ, свидетельствующие о дискретном характере процесса разрушения, происходящего как череда надрывов и нарушений сплошности структуры. Столбиками показаны амплитуды A зарегистрированных событий АЭ, точками прочие их параметры, а именно O – число осцилляций в сигнале АЭ; Rt – время нарастания АЭ сигнала (Райс тайм), мкс; X – координата места возникновения АЭ события.

В зависимости от свойств исследуемого материала преимущественными факторами развития разрушения могут быть возникновение пор при разрыве локальных связей между элементами структуры либо процессы, связанные с перемещением и скоплением дислокаций в определенных локальных областях материала. Как правило, при этом возникают значительные напряжения в зоне скопления и происходит образование микротрещин, последующее развитие которых приводит к разрушению. В большинстве случаев реализуется смешанный механизм разрушения. В данной работе за счет применения специально подобранной конструкции образца и выбора соответствующего материала удалось получить минимальный набор событий АЭ, каждое из которых может быть сопоставлено с определенным процессом при разрушении материала.

© А. Я. Недосека, С. А. Недосека, Л. И. Маркашова, О. С. Кушнарева, 2016

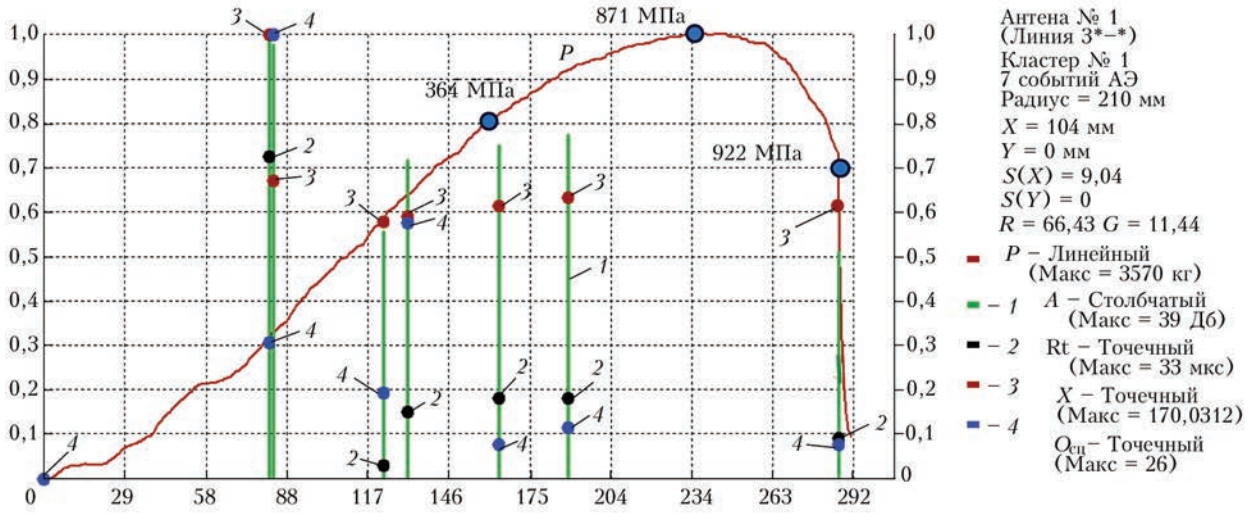


Рис. 1. Параметры АЭ сигналов в относительных единицах, полученные при испытании образца (рис. 2). Представлены номер локационной АЭ антенны и ее тип (в данном случае линейный), указан выделенный для анализа кластер радиусом 210 мм с координатой центра 104 мм. Погрешность определения центра кластера на базе 210 мм равна 9,04 мм. На кривых деформирования показаны истинные значения напряжений в МПа. На графике не представлены другие информативные параметры АЭ, такие как энергия, спектр, частоты, чтобы избежать затруднений при просмотре и анализе (база 210 мм)

Таким образом, в соответствии с поставленной задачей разработан специальный образец с плавным ослаблением в центре на длине 40 мм (рис. 2). Это позволило получить разные значения пластических деформаций в разных сечениях образца за счет изменяющегося диаметра, уменьшив таким образом число необходимых образцов и повысив качество результатов исследования.

Потребовалась также серьезная доработка существующей аппаратуры АЭ, особенно в области ее программного обеспечения, которое должно обеспечить достаточно сложную обработку АЭ сигналов с учетом требований распознавания изменений структуры. Для этого были созданы соответствующие алгоритмы, позволяющие не только проводить первичную обработку АЭ информации, но и комбинировать эту информацию в различных сочетаниях, позволяющих наиболее наглядно представлять результаты измерений. Таким образом, на рис. 1 представлен типичный график записи АЭ и дополнительной информации, получаемой при растяжении образца, и позволяющей анализировать результаты измерений, а на рис. 2 окончательно принятая для исследований конструкция образца. Последняя определялась возможностью за счет изменяющегося диаметра получить различную пластическую деформацию в каждом его сечении. Такой прием позволил в рамках одного испытания получить различные величины пластической деформации того же самого материала, обеспечив идентичность материала в разных сечениях. В противном случае пришлось бы испытывать и разрезать с целью последующих металлографических исследований несколько образцов.

*Р*астяжение образца осуществляли на разрывной машине Р-20[1]. АЭ датчики устанавливали на захватах по обе стороны образца на расстоянии 138 мм. Результаты испытаний, представленные на рис. 2, получены с использованием данных рис. 1, из которого определены необходимые параметры АЭ. В соответствии с ними на образце установлены координаты импульсов АЭ с указанием последовательности их появления.

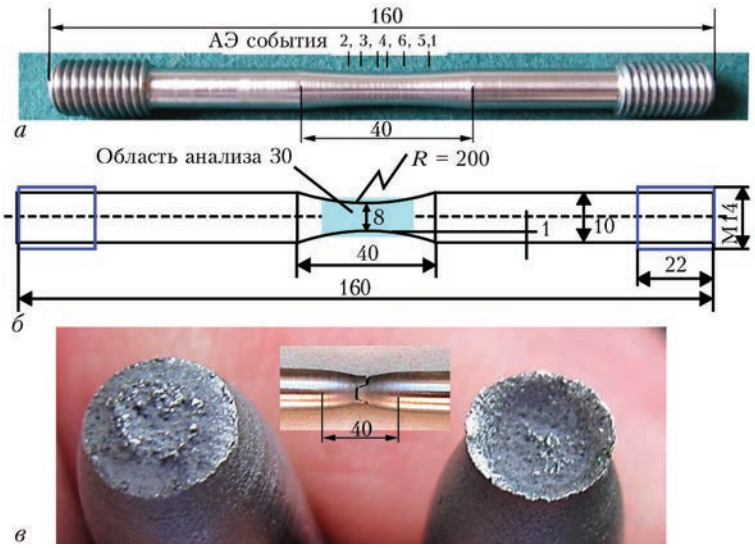


Рис. 2. Образец для испытаний на растяжение из стали 12Х1МФ (*а*) и его чертеж (*б*). На образце показаны места и последовательность появления АЭ событий *1–6*. Место разрушения с образовавшейся шейкой (четко видна линия разделения образца) и поверхность разрушения с хрупкой в центре и пластической по контуру частями (*в*). Точное время и место возникновения каждого события АЭ см. на рис. 1

[1]Настройка испытательного оборудования и испытание образца были выполнены с участием Ю. А. Смоголя

Полученные импульсы характеризуются различным числом осцилляций. Проведенные металлографические исследования позволяют предположить, что для данного образца число осцилляций прямым образом коррелирует с изменениями в структуре материала, связанными, в первую очередь, с дискретным перемещением групп дислокаций.

Первое событие АЭ характеризуется появлением восьми таких перемещений. Второе событие АЭ возникло позже и сопровождалось пятью скачками перемещений. Его координата практически симметрична координате первого события относительно центра разрушения и находится с левой стороны (см. рис. 2). Третье событие произошло несколько правее второго и насчитывало 15 осцилляций. В этом случае дислокации продвигались значительно интенсивнее. Четвертое, пятое и шестое события явились завершающими и содержат всего две, три осцилляции. Далее произошло разрушение и шестое событие АЭ строго совпало с местом разрушения образца. Точное расположение событий по времени и координатам на образце представлены на рис. 1. Там же можно видеть и время нарастания сигнала АЭ события в каждом конкретном случае (*Rt*).

Отметим, что для данного эксперимента характерно снижение длительности и частоты зарегистрированных событий АЭ по мере деформирования образца. На рис. 3 показана диаграмма, где точками представлены указанные параметры, обозначенные соответственно *w* (мкс) и *F* (кГц). Каждый последующий скачок изменений структуры приводит к появлению более короткого по длительности события АЭ с меньшей частотой. Это свидетельствует о влиянии пластической деформации на тип и характер возникающих в процессе деформирования повреждений. При наличии необходимой статистики, которая может быть подтверждена при достаточно большом числе испытаний, аналогичных проведенному, изменения данных параметров могут быть использованы в качестве характеристик достижения материалом соответствующих стадий деформирования. В то же время не исключено, что данная особенность присуща только конкретному образцу. В этом случае потребуется дальнейший, более детальный анализ по сопоставлению зарегистрированных сигналов АЭ возникшим в материале повреждениям.

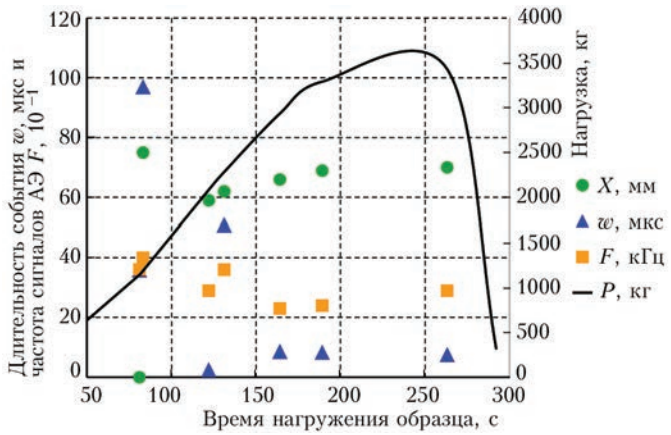


Рис. 3. Длительность *w*, координата *X* и частота *F* сигналов АЭ при деформировании образца, сопоставленные с кривой нагружения *P*. Видна четкая тенденция к снижению обоих параметров по мере деформирования: длительности сигнала в 10 раз, частоты более чем в 1,5 раза. База 140 мм

В целом малое число зарегистрированных событий АЭ свидетельствует о том, что механизм разрушения образца ближе к хрупкому, нежели к вязкому, особенно в центральной части образца, хотя чисто хрупким он не является, о чем свидетельствует наличие шейки. Об этом же свидетельствует характер излома, сфотографированного после разрушения. Металлографический анализ вносит в полученную картину разрушения и возникновения в его процессе сигналов АЭ необходимую ясность. На рис. 4 показана микроструктура поперечных сечений образца в местах появления АЭ событий.

Напомним, что хрупкое разрушение характеризуется преимущественно дислокационным механизмом повреждаемости, следствием которой является скачкообразное возникновение трещин. Данный механизм существенно отличается от разрушения вязкого, при котором наблюдается постепенное возникновение, рост и последующее соединение большого числа несплошностей типа пор. Трещины при таком механизме возникают в наиболее ослабленных порами участках материала.

В случае испытания образца, рассматриваемого в данной работе, преимущественным явлением при деформировании образца является возникновение и рост дислокационных полей, хотя наблюдаются и четко просматриваются также отдельные поры. Таким образом, выбранный модельный материал позволяет исследовать смешанный механизм разрушения, в котором преобладает хрупкий компонент.

Рассматривая последовательно изменение микроструктуры с увеличением величины пластической деформации, видим все более значительное увеличение скопления дислокаций на каждом последующем этапе деформирования. Величину пластической деформации ε* вдоль оси образца (рис. 5) рассчитывали по изменению диаметра образца после разрушения по формуле $\varepsilon^* = 2\varepsilon_{поп}$, где $\varepsilon_{поп}$ – поперечные пластические деформации [3]▲.

▲Интегрирование функции распределения пластических деформаций (рис. 5) позволило определить общее удлинение образца после разрушения путем суммирования элементарных деформаций в каждом его сечении. В результате интегрирования получена величина Δl = 2,6 мм. Прямые замеры по удлинению образца показали величину Δl = 2,9 мм.

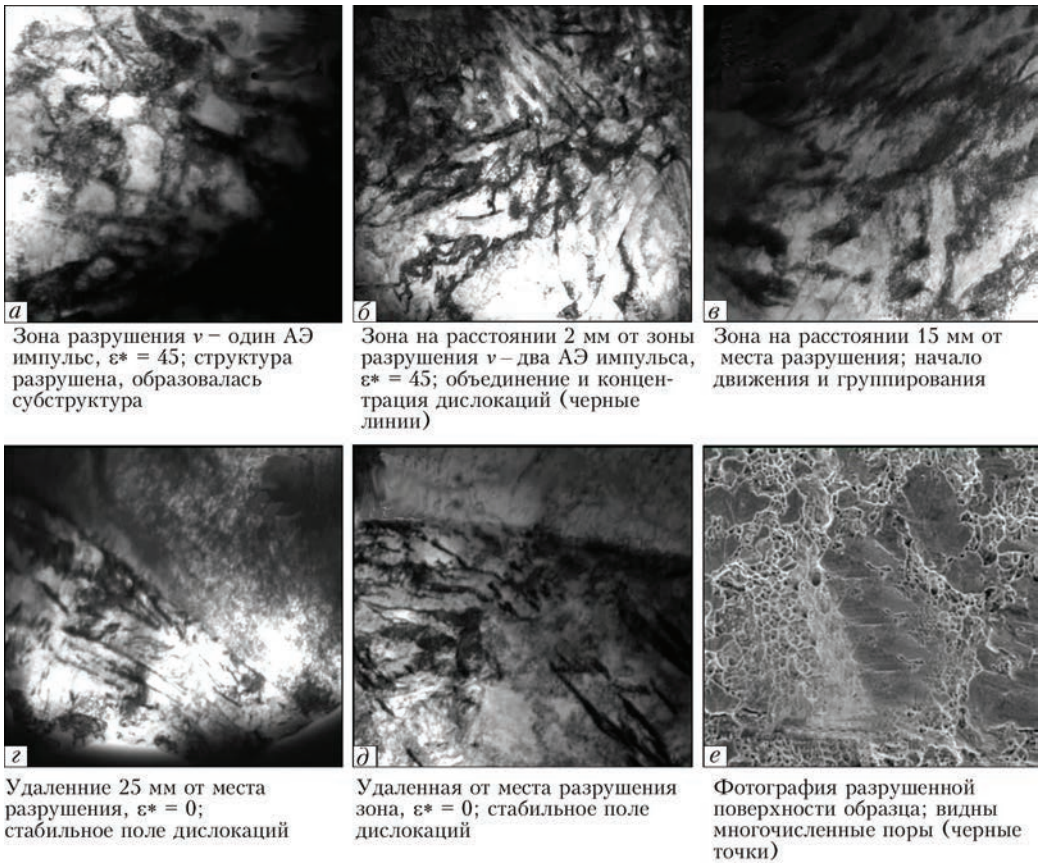


Рис. 4. Микроструктура в поперечных сечениях образца, определенных АЭ (*а–б*). Видны скопления дислокаций (черные линии) и их перераспределение в результате пластической деформации; *г*, *д* – структура материала в исходном состоянии, когда пластические деформации отсутствуют, ε* = 0 [3]

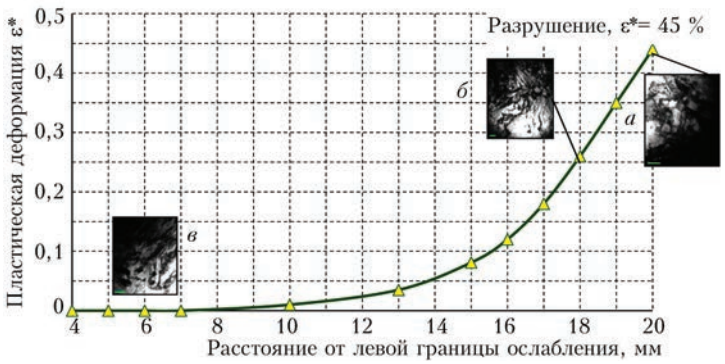


Рис. 5. Распределение пластических деформаций в образце после разрушения и связанные с ними изменения микроструктуры материала в поперечных сечениях в зависимости от величины этой деформации (*а–в* на рис. 4)

Проведенный металлографический анализ подтверждает данные АЭ о реализованном в процессе деформирования образца механизме разрушения.

Настоящая работа показывает, что обнаруживаются четкие взаимосвязи параметров АЭ с изменениями структуры материала. Полученных данных сейчас недостаточно для того, чтобы вывести общие закономерности этих изменений. Основным результатом работы является то, что примененными методами такие изменения отслеживаются и могут быть использованы в дальнейшем при оценке изменений структуры материалов неразрушающим методом.

Выводы

Появление событий АЭ в процессе деформирования образца весьма точно соответствует изменениям структуры материалов, коррелирующим, в свою очередь, с величиной пластической деформации.

На участках образца, расположенных вне зоны утонения и деформировавшихся преимущественно в упругой области, АЭ и существенных изменений структуры не наблюдается.

Показано, что разрушение стали 12Х1МФ происходит по смешанному механизму, с некоторым преобладанием хрупкого над вязким.

Основным фактором, приведшим к разрушению исследуемого образца, послужило постадийное развитие полей скопления дислокаций, приведших к образованию субструктуры, микротрещин и небольшого числа пор, с последующим переходом к росту макротрещины в центральной части образца.

Примененные алгоритмы и программное обеспечение для систем АЭ диагностики типа ЕМА представляются на первом этапе исследований вполне

достаточными для получения и анализа акустической и сопутствующей информации, необходимой для оценки процессов накопления повреждений в деформируемом материале и его разрушении.

1. Андрейкив А. Е. Метод АЭ в исследовании процессов разрушения / А. Е. Андрейкив, Р. В. Лысак. – К.: Наукова думка, 1989. – 176 с.
2. Лебедев А. А. Экспресс-метод оценки трещиностойкости пластичных материалов / А. А. Лебедев, Н. Г. Чаусов. – К.: Препринт ИПП НАН Украины, 1998. – 43 с. – (Препринт/НАН Украины, ИПП).
3. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Н. Н. Малинин. – М.: Машиностроение, 1968. – 400 с.
4. Недосека А. Я. Влияние характера локальных изменений структуры материала на формирование упругих волн деформаций на поверхности толстой пластины / А. Я. Недосека // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1991. – № 3. – С. 66–73.
5. Недосека А. Я. О квантовании процесса возникновения и развития трещин / А. Я. Недосека // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1989. – № 1. – С. 11–15.
6. Чаусов Н. Г. Влияние вида напряженного состояния на параметры акустической эмиссии на заключительных стадиях деформирования металлов / Н. Г. Чаусов, С. А. Недосека, А. А. Лебедев // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1993. – № 3. – С. 18–23.
7. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / А. Я. Недосека ; под ред. Б. Е. Патона. – [4-е изд., перераб. и доп.]. – К.: Индпром, 2008. – 814 с.
8. Недосека С. А. Прогноз разрушения по данным акустической эмиссии / С. А. Недосека // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2007. – № 2. – С. 3–9.
9. Недосека А. Я. Об оценке надежности эксплуатирующихся конструкций (состояние вопроса и перспектива развития) / А. Я. Недосека, С. А. Недосека // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2010. – № 2. – С. 7–17.
10. Скальський В. Р. Оцінка накопичення об'ємної пошкодженості твердих тіл за сигналами акустичної емісії / В. Р. Скальський // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2003. – № 4. – С. 29–36.
11. Balderston H. L. The broad range detection of incipient failure using the acoustic emission phenomena / H. L. Balderston // A symposium presented at the December Committee Week American Society for Testing and Materials. – Bal Harbour, 7–8 December 1971. – P. 297–317.
12. Stone D. E. Acoustic Emission parameters and their interpretation / D. E. Stone, P. F. Dingwall // NDT international. – 1977. – 10. – P. 51–56.
13. Gillis P. P. Dislocation motions and acoustic emission / P. P. Gillis // A symposium presented at the December Committee Week American Society for Testing and Materials. – Bal Harbour, 7–8 December 1971. – P. 20–29.
14. Tetelman A. S. Acoustic emission testing and micro cracking processes / A. S. Tetelman, R. Chow // A symposium presented at the December Committee Week American Society for Testing and Materials. – Bal Harbour, 7–8 December 1971. – P. 30–40.
15. Tatro C. A. Design criteria for acoustic emission experimentation / C. A. Tatro // A symposium presented at the December Committee Week American Society for Testing and Materials. – Bal Harbour, 7–8 December 1971. – P. 84–113.

A task was set to compare acoustic emission parameters with those structural changes, which it accompanies. Some aspects of the connection between changes in micro- and macrostructure of 12Kh1MF steel during fracture propagation were studied. Investigation procedure and sample design were developed, which allow effective study of the connections between AE parameters and changes of material structure at different stages of fracture propagation. AE data derived at sample tension were compared with the results of metallographic studies. It is shown that parameters of acoustic emission arising at material deformation, may be quite effective characteristics of the change in material micro- and macrostructure at different stages of damage accumulation and fracture propagation. 15 References, 5 Figures.

K e y w o r d s : acoustic emission, micro- and macrostructures of steel, fractures, metallographic studies, damage accumulation

Поступила в редакцию
28.09.2016

ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОСВАРКИ им. Е.О. ПАТОНА НАНУ,
МГП «ИНДПРОМ» ПРЕДСТАВЛЯЮТ

ПРИБОРЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

ДЛЯ СИСТЕМ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Базовые 4- и 16-канальные приборы EMA-4/4 и EMA-4/16

Приборы разработаны на основе устройств SENSOPHONE (Géreb és Társa, Венгрия). Системы EMA предназначены для периодического контроля и непрерывного мониторинга состояния трубопроводов, сосудов давления, хранилищ, оборудования производств различного назначения с индикацией степени опасности и прогнозом разрушения.

ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ, МГП «Индпром»:
(044) 200-66-46, (044) 205-25-88; inpat59@ukr.net

УДК 620.13.40

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЗАРОЖДЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ДОКРИТИЧЕСКОЙ ПОВРЕЖДЕННОСТИ МЕТАЛЛА СВАРНЫХ ТРУБОПРОВОДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ МАЛОЦИКЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ

Е. А. ВЕЛИКОИВАНЕНКО, А. С. МИЛЕНИН, Г. Ф. РОЗЫНКА, Н. И. ПИВТОРАК
ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Разработан комплекс математических моделей и программных средств их реализации для численного прогнозирования совместных процессов термодеформирования и докритического разрушения металла ответственных сварных конструкций в условиях сварки и под действием переменного силового воздействия. Предложены критерии зарождения микро- и макроразрушения при пластическом течении материала по вязкому и хрупко-вязкому механизмам. На примере элементов трубопроводов с изолированными и множественными дефектами коррозионного утонения стенки в области монтажной (ремонтной) сварки исследованы особенности зарождения и развития докритического разрушения под действием малоциклового внешнего силового воздействия. Библиогр. 20, рис. 7.

Ключевые слова: докритическое повреждение, вязкое разрушение, ультрамалоцикловая и малоцикловая усталость, трубопроводный элемент, монтажная и ремонтная сварка

Техническая диагностика и оценка работоспособности ответственных сварных конструкций предполагает проведение всестороннего анализа их фактического состояния неразрушающими методами контроля с целью выявления, прежде всего, дефектов несплошности, возникших в процессе эксплуатации [1–3]. И если обнаружение макроскопических дефектов (трещин, пор, локальных коррозионных потерь металла) не вызывает принципиальных сложностей, то дефектоскопия рассеянной докритической микроповрежденности (ДМ) металла сопряжена с объективными сложностями, связанными с ее микромасштабностью. Хотя наличие на отдельных участках конструкции ДМ не приводит к существенному снижению ее несущей способности, свойства металла при накоплении поврежденности меняются, и для проведения аналитических оценок в рамках процедур технической диагностики необходимо использование методик, учитывающих особенности состояния металла на различных участках и его влияние на эксплуатационные характеристики конструкции в целом.

Появление рассеянной поврежденности металла может быть обусловлено рядом факторов различной природы: интенсивным пластическим деформированием, усталостным нагружением, высокой концентрацией диффузионного водорода, радиационным облучением и др. [4–6]. При этом накопление ДМ под действием регулярных эксплуатационных воздействий учитывается при разработке конструкционных решений как деградация материала, что позволяет консервативно оценивать их текущее состояние. Но если конструкция подвергалась существенному нерегулярному воздействию природного или техногенного характера (оползни, землетрясения, перегрузка при пусконаладочных работах и т.п.), то необходимо оценить степень повреждения, которое получил материал. Наличие монтажных или ремонтных сварных швов усложняет такой анализ, так как сварные соединения являются местами локальной химической и структурной неоднородности, а также характеризуются остаточным напряженно-деформированным состоянием, обусловленным накопленными в процессе сварки пластическими деформациями, которые зависят от технологических параметров сварки. Поэтому разработки математических моделей накопления ДМ ответственных сварных конструкций, в частности, для характерных случаев существенного внешнего статического, статически переменного или усталостного воздействия, вызывающего пластическое течение металла и нарушение его сплошности, являются актуальными и практически важными.

Трубопроводные элементы и сосуды давления являются одними из самых распространенных типов сварных конструкций, зачастую, предполагающих долгосрочную эксплуатацию в условиях внешнего силового нагружения и агрессивного коррозионного воздействия. Допустимость формирующихся при этом эксплуатационных дефектов определяется на основе актуальных нормативных документов и стандартов исходя из предположений об известных закономерностях деградации свойств материала конструкции во времени [7, 8]. Избыточ-

© Е. А. Великоиваненко, А. С. Миленин, Г. Ф. Розынка, Н. И. Пивторак, 2016

ное нагружение, которое сопровождается пластическим деформированием металла, может вызывать зарождение ДМ по вязкому механизму разрушения, уменьшая площадь эффективного поперечного сечения конструкции, что не учитывается в соответствующих методиках оценки состояния трубопроводов и сосудов давления.

Авторами в рамках предыдущих исследований были предложены подходы численного анализа предельного состояния сварных трубопроводных элементов с дефектами локальной коррозии металла в области металла шва и зоны термического влияния (ЗТВ) [9, 10]. С их помощью было исследовано влияние послесварочного напряженного состояния на склонность металла конструкции к зарождению и развитию разрушения в области дефекта. В частности, показано, что взаимодействие полей напряжений и пластических деформаций в области геометрического концентратора и места сварки может иметь негативное влияние на статическую прочность конструкции. Но важные с практической точки зрения задачи оценки работоспособности трубопроводных элементов с коррозионными дефектами несплошности в области монтажной или ремонтной сварки в условиях ультрамалоцикловой и малоцикловой нагрузки требуют дальнейшего развития данных методик.

Целью настоящей работы является разработка методов и соответствующих математических моделей процессов зарождения и развития ДМ в металле ответственных сварных конструкций под воздействием ультрамалоциклового и малоциклового нагружения с точки зрения оценки их состояния, а также исследование на примере трубопроводных элементов с коррозионными дефектами несплошности в области монтажной или ремонтной сварки характерных особенностей влияния сварки на работоспособность дефектных конструкций.

Известно, что механизм усталостного разрушения при ультрамалоцикловом и малоцикловом нагружении связан с накоплением и развитием ДМ на каждом из циклов пластического деформирования металла. При континуальном описании этого процесса принято использовать мезомасштабное приближение, основанное на моделях вязкого разрушения сплошной среды [11, 12]. Для прогнозирования данных процессов необходимо корректно описать этапы вязкого разрушения с учетом неизотермического состояния материала при сварке. Для этого модели разрушения должны быть объединены с соответствующими моделями кинетики температурного и напряженно-деформированного состояний при сварке и циклическом нагружении, что позволит получить полную систему взаимосвязанных физико-механических процессов, имеющих место в металле трубопровода.

Кинетика температурного поля при монтажной и ремонтной дуговой сварке может быть описана с помощью нестационарного уравнения теплопроводности, в многомерном случае представимого в виде [13]:

$$c\gamma(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla\left[\lambda(T)\nabla T\right], \qquad (1)$$

где $c\gamma$, λ – объемная теплоемкость и теплопроводность металла, соответственно; T – температура конструкции в момент времени t в точке с координатами (r, β, z), согласно схеме, представленной на рис. 1.

Для решения уравнения (1) и адекватного учета особенностей технологического процесса сварки необходима постановка граничных условий, которые для рассматриваемого случая имеют следующий вид:

$$-\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial n} = \alpha_{т}\left(T - T_0\right) + \varepsilon_0\sigma_{SB}\left(T^4 - T_0^4\right) - q\,, \qquad (2)$$

где n – нормаль к поверхности конструкции; $\alpha_{т}$ – коэффициент поверхностной теплоотдачи; ε_0 – степень черноты поверхности трубопровода; σ_{SB} – константа Стефана–Больцмана; T_0 – температура окружающей среды; q – поверхностный поток тепла от источника сварочного нагрева в рассматриваемой области поверхности.

Конечно-разностное решение задачи (1)–(2) позволяет оценивать распределение температур в процессе сварки с учетом конкретных технологических параметров. Расчетная кинетика температурного состояния конструкции при сварке лежит в основе численной оценки напряженно-деформированного и поврежденного состояний трубопроводного элемента. Компоненты тензора деформаций ε_{ij} ($i, j = r, \beta, z$) в рассматриваемом случае представимы в виде суперпозиции следующих слагаемых:

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^{e} + d\varepsilon_{ij}^{p} + \delta_{ij}\left(d\varepsilon_{ij}^{T} + df/3\right), \qquad (3)$$

где $d\varepsilon_{ij}^{e}$, $d\varepsilon_{ij}^{p}$, $d\varepsilon_{ij}^{T}$ – компоненты приращения тензора деформаций, которые определяются упругим

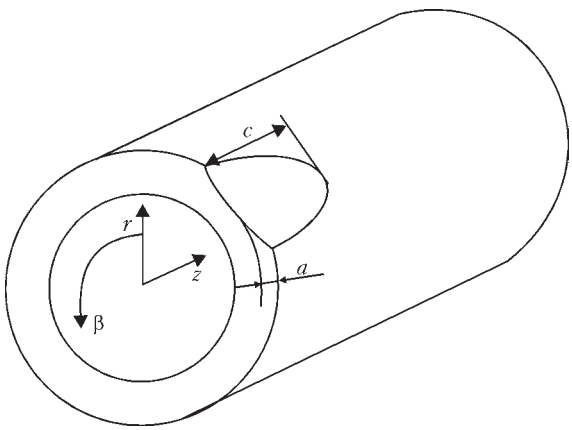


Рис. 1. Схема участка трубопровода с внешним полуэллиптическим дефектом локального утонения стенки

механизмом деформирования, пластическим течением и температурным расширением, соответственно; f – объемная концентрация равномерно распределенных пор вязкого разрушения.

В выражении (3) фигурирует объемная концентрация равномерно распределенных пор f, наличие которой отличает разработанные модели от классических методов анализа термодеформированного состояния сплошной среды. Наличие ДМ не только имеет аддитивную составляющую в тензоре деформаций, но и меняет поверхность текучести материала Ф, для математического описания которой нашли широкое применение подходы Гурсона, Твергаарда и Нидлмана (так называемая ГТН модель) [14]:

$$\Phi = \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_T}\right)^2 - \left(q_3 f^*\right)^2 + 2q_1 f^* \cosh\left(q_2 \frac{3\sigma_m}{2\sigma_T}\right) - 1, \quad (4)$$

где $q_1 = 1{,}5$, $q_2 = 1$, $q_3 = 1{,}5$ – константы; f^* – эквивалентная концентрация пор; σ_T – предел текучести материала; $\sigma_m = (\sigma_{rr} + \sigma_{\beta\beta} + \sigma_{zz})/3$ – среднее значение нормальных компонент тензора напряжений σ_{ij}; $\sigma_i = \sqrt{\sigma_{ij}\sigma_{ij}/2}$ – интенсивность напряжений.

Эквивалентная концентрация пор f^* в (4), учитывающая взаимодействие между отдельными несплошностями, оценивается на основе следующих соотношений [15]:

$$f^* = \begin{cases} f, \text{ если } f \le f_c, \\ f_c + \dfrac{f_u^* - f_c}{f_F - f_c}\left(f - f_c\right), \text{ если } f > f_c, \end{cases} \quad (5)$$

где f_c – критическая концентрация несплошностей, до достижение которой отдельные поры не взаимодействуют, (принято считать $f_c = 0{,}15$); f_F – концентрация пор, при которой происходит разрушение конечного элемента; $f_u^* = 1/q_1$.

Как видно из (4), предельный переход $f^* \to 0$ переводит ГТН модель в условие текучести Мизеса. Также для корректного описания предельного состояния рассматриваемых конструкций необходимо учитывать деформационное упрочнение металла в условиях статического и циклического эксплуатационного нагружения, а именно, изменение его предела текучести согласно следующему соотношению [16]:

$$\sigma_T = \sigma_T^0 \left\{1 + c_1 \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0}\right) + c_2 \left[\ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right]^2\right\}\left[1 + \left(\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_0}\right)^m\right],$$

где $c_1 = 2{,}149 \cdot 10^{-3}$; $c_2 = 9{,}112 \cdot 10^{-2}$; $\varepsilon_0 = 1{,}540 \cdot 10^{-4}$, $m = 0{,}14$ – константы; точкой над переменной обозначено дифференцирование по времени.

Для оценки зарождения пор вязкого разрушения при пластическом течении материала в неизотермическом случае использовался модифицированный критерий Джонсона–Кука [9], согласно которому в некотором объеме металла появляется начальная пористость с концентрацией f_0 при выполнении следующего условия:

$$\chi_к = \int \frac{d\varepsilon_i^p}{\varepsilon_c(T)} > 1, \quad (6)$$

где $d\varepsilon_i^p = \sqrt{2}/3\sqrt{d\varepsilon_{ij}^p d\varepsilon_{ij}^p}$; $\varepsilon_c(T)$ – критическая величина пластических деформаций.

Критическая пластическая деформация ε_c в (6) может быть вычислена согласно следующему соотношению:

$$\varepsilon_c(T) = \left[d_1 + d_2 \exp\left(-d_3 \frac{\sigma_m}{\sigma_i}\right)\right] \exp\left\{\left[\frac{\sigma_T - \sigma_T(T)}{B_f}\right]^\xi\right\},$$

где d_1, d_2, d_3, B_f, ξ – константы.

Дальнейший рост концентрации пор вязкого разрушения в процессе пластического деформирования металла, в частности, при эксплуатационном статическом или циклическом нагружении, подчиняется закону Райса–Трэйси, а именно [17]:

$$df = k_{ms} f_0 K_1 \exp\left(K_2 \frac{\sigma_m}{\sigma_i}\right) d\varepsilon_i^p, \quad (7)$$

где k_{ms} – коэффициент, учитывающий пластическое микродеформирование металла; $K_1 = 0{,}28$, $K_2 = 1{,}5$ – константы.

Конечно-элементное решение краевой задачи нестационарной термопластичности проводилось путем прослеживания совместного развития упруго-пластических деформаций, докритического и критического разрушения по вязкому механизму. Реализация такого численного прослеживания связана с двумя нелинейностями по физическим процессам: пластическому деформированию и разрушению. Для формального решения этих нелинейных задач были реализованы соответствующие итерационные процессы, позволяющие находить состояние конечного элемента, удовлетворяющее уравнениям равновесия и условию (4). Так, для решения нелинейности по пластическому деформированию был использован подход, предложенный В. И. Махненко [18, 19], а именно, рассмотрение функции состояния материала Ψ, удовлетворяющей следующим условиям:

$$\Psi = \frac{1}{2G}, \text{ если } \sigma_i < \sigma_s = \sigma_T \sqrt{1 + \left(q_3 f^*\right)^2 - 2q_1 f^* \cosh\left(q_2 \frac{3\sigma_m}{2\sigma_T}\right)},$$
$$\Psi > \frac{1}{2G}, \text{ если } \sigma_i = \sigma_s,$$
$$\text{состояние } \sigma_i > \sigma_s \text{ недопустимо,} \quad (8)$$

где $G = 0{,}5\,E/(1+\nu)$; E – модуль Юнга; ν – коэффициент Пуассона.

Основная сложность при моделировании циклического нагружения заключается в том, что небольшие изменения состояния металла на одном цикле нагружения, а именно, накопление и рост ДМ, вызывают изменение поверхности текучести согласно (4), что вызывает изменение петли пластического деформирования. Но при этом на каждом этапе нагрузки необходимо определить равновесное состояние поврежденности и соответствующее ему распределение напряжений и деформаций. Для этого из предположения, что стационарное состояние характеризуется пренебрежимо малой скоростью роста ДМ по (7), предлагается проводить следующий итерационный процесс по функции Ψ_K:

$$F = \begin{cases} F + dF, \text{если } f_0 K_1 \exp(K_2 \dfrac{\sigma_m}{\sigma_i}) d\varepsilon_i^p = \\ \qquad = \Psi_K \le \Psi_K^0 \approx 10^{-5}, \\ F, \text{если } \Psi_K > \Psi_K^0, \end{cases} \qquad (9)$$

где F – система внешних силовых нагрузок, действующих на конструкцию; dF – приращение силовых нагрузок в процессе численного прослеживания.

Таким образом, решение задач (8)–(9) на каждом этапе прослеживания позволяет с контролируемой степенью точности определять степень поврежденности материала сварной конструкции с учетом ее геометрических особенностей. В качестве критерия зарождения макроскопического разрушения использовалось условие хрупко-вязкого разрушения, а именно, выполнение одного из трех условий:

$$\left(\Psi - \frac{1}{2G}\right)_{KP} \ge \frac{\varepsilon_f - \varepsilon_p^*}{1{,}5\sigma_i} \approx \frac{\varepsilon_f - \varepsilon_p^*}{1{,}5\sigma_s(\varepsilon_p, T)},$$
$$f^* \to f_d^* = \frac{2q_1}{q_3}\cosh\left(\frac{3q_2\sigma_m}{2\sigma_T}\right), \qquad (10)$$
$$\frac{\sigma_1}{1-2f/3} > S_K,$$

где S_K – напряжение микроскола; индекс «*» относит переменную к предыдущему шагу прослеживания; ε_f – предельная деформационная способность материала.

В случае, если для некоторого конечного элемента выполняется одно из условий (10), считалось, что данный конечный элемент теряет свою несущую способность и на его месте сформировалась макроскопическая несплошность. Дальнейшее нагружение конструкции и развитие макроразрушения в итоге приводит к лавинообразной потере несущей способности материала в рамках итерационного процесса (9), что можно интерпретировать как спонтанное разрушение конструкции. В зависимости от точности имеющихся данных и от производственной необходимости предельным состоянием ответственной конструкции можно считать либо момент зарождения первой макронесплошности, либо ее спонтанное разрушение.

Посредством данной численной методики в рамках настоящей работы было проведено исследование особенностей взаимного влияния дефектов локальной потери металла и областей монтажной и ремонтной сварки. Для этого были рассмотрены три характерных примера, а именно:

1) изолированный дефект утонения в области монтажного кольцевого шва (рис. 2, *а*);

2) изолированный дефект утонения на внутренней поверхности трубопровода в области многопроходной ремонтной наплавки локальной потери металла (рис. 2, *б*);

3) множественный дефект утонения стенки на внешней поверхности трубы в области многопроходной ремонтной наплавки локальной потери металла (рис. 2, *в*).

Без существенного ограничения общности считалось, что рассматриваемый трубопровод (диаметром $D = 1420$ мм и с толщиной стенки $\delta = 20$ мм) подвержен переменному внутреннему давлению $P(t)$, которое меняется во времени t по синусоидальному закону:

$$P(t) = P_0 + dP\sin\left(2\pi\frac{t}{\tau}\right),$$

где τ – период колебаний давления.

Значения расчетных параметров принимались следующими: $f_0 = 0{,}01$, $B_f = \sigma_т$, $\xi = 3$, $k_{ms} = 7$; мате-

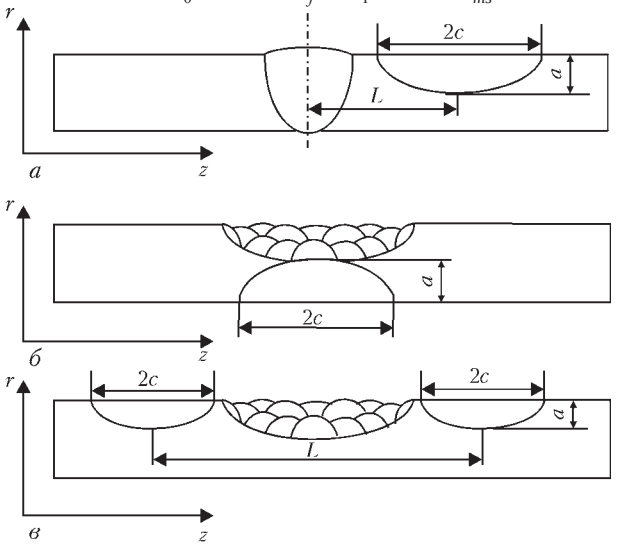


Рис. 2. Схемы различных видов коррозионной дефектности в области монтажной или ремонтной сварки: *а–б* – изолированный дефект утонения в области соответственно монтажного кольцевого шва и в области многопроходной ремонтной наплавки локальной потери металла; *в* – множественный дефект утонения стенки трубы в области многопроходной ремонтной наплавки локальной потери металла

риал трубопровода – сталь 09Г2С, свойства которой приведены, в частности, в работе [20].

Как показали результаты численных исследований, основанных на изложенной выше методологии, взаимодействие эксплуатационных напряжений в области геометрического концентратора и полей остаточных послесварочных напряжений (рис. 3) имеет влияние на характер развития ДМ и предельное количество циклов N_f, после которых в конструкции появляются первые макронесплошности. Так, при цикле внутреннего давления (P_0 = 8,0 МПа, dP = 2,6 МПа, τ = 60 с), когда реализуются условия ультрамалоцикловой усталости (количество циклов не более 10^3), зависимость N_f от глубины дефекта a имеет квазилинейную зависимость в диапазоне значений N_f = 320...360 циклов (рис. 4, *а*). При тех же условиях дефект в области сварочной наплавки имеет схожий диапазон предельных значений N_f (отличие объясняется внутренним расположением дефекта, что делает дефект менее опасным как с точки зрения статической прочности конструкции, так и с позиции ее сопротивления усталости), но характеризуется существенной нелинейностью (рис. 4, *б*). Это связано с тем, что увеличение глубины утонения стенки трубопровода под областью ремонтной наплавки, с одной стороны, вызывает увеличение напряжений в области геометрического концентратора, с другой стороны, уменьшает количество наплавленного металла и снижает уровень послесварочных напряжений.

Исследования более сложного случая множественной коррозионной поврежденности (пример 3) показали, что наличие двух симметричных относительно области многопроходной наплавки дефектов вызывает существенное (более чем в 4 раза) снижение стойкости трубопровода к усталостному разрушению несмотря на относительно большое расстояние между ними (рис. 5). Это объясняется тем, что ослабленная ремонтной сваркой область способствует общему снижению жесткости стенки, формированию более высоких областей напряжений и, соответственно, более высокой концентрации пор вязкого разрушения. Для демонстрации этого было проведено дополнительное исследование кинетики ДМ с множественной коррозионной поврежденностью (a = 10 мм, $2c$ = 40 мм) для меньших нагрузок (P_0 = 7,0 МПа, dP = 1,8 МПа). Как показано на рис. 6, это вызывает постепенное накопление пластических деформаций и распространение площа-

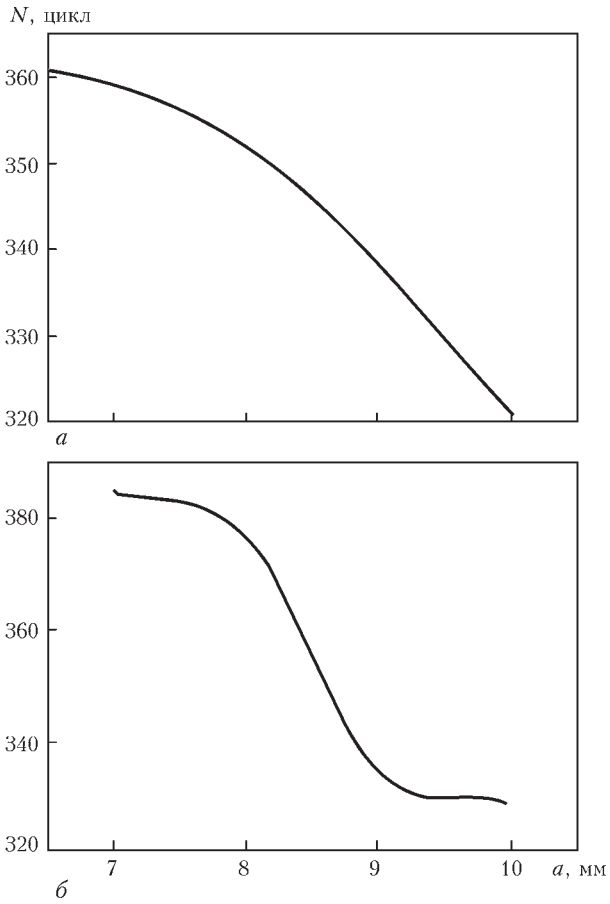


Рис. 4. Зависимость предельного количества циклов нагружения N_f от глубины дефекта утонения длиной $2c$ = 40 мм в области монтажного шва (*а*) и многопроходной ремонтной сварочной наплавки (*б*)

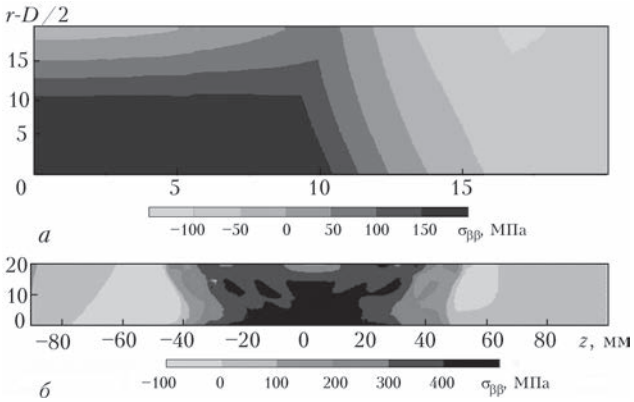


Рис. 3. Результаты моделирования поля окружных напряжений $\sigma_{\beta\beta}$ в области монтажной сварки (*а*) и многопроходной ремонтной наплавки дефекта локального утонения стенки трубопровода (*б*)

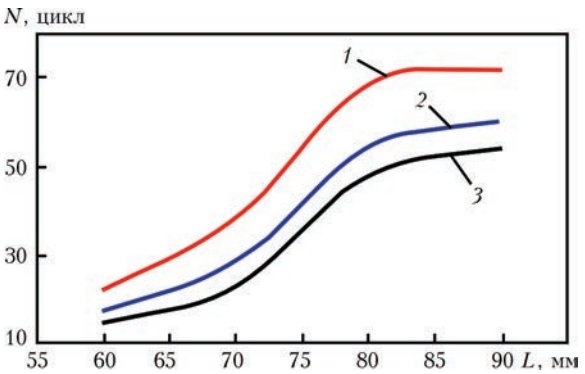


Рис. 5. Зависимости количества циклов нагружения внутренним давлением участка трубопровода с областью ремонтной сварочной наплавки до зарождения макроразрушения N_f от глубины дефектов утонения a и расстояния между ними L ($2c$ = 40 мм): *1* – a = 8; *2* – 10; *3* – 12 мм

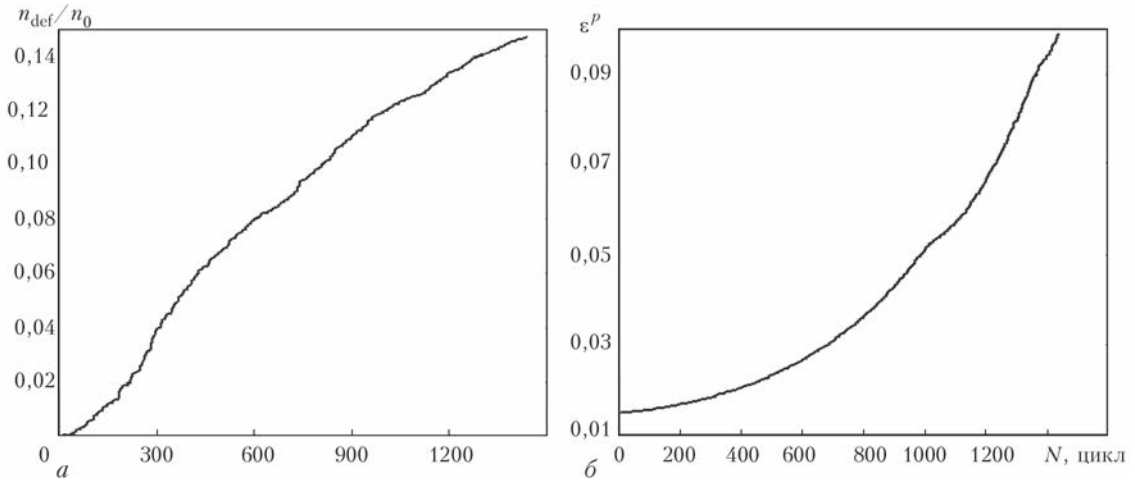


Рис. 6. Кинетика накопления пластических деформаций (*а*) и относительной поврежденности (*б*) от количества циклов нагружения трубопровода с множественной коррозионной поврежденностью (*a*×2*c* = 10 мм×40 мм, *L* = 60 мм) в области ремонтной наплавки

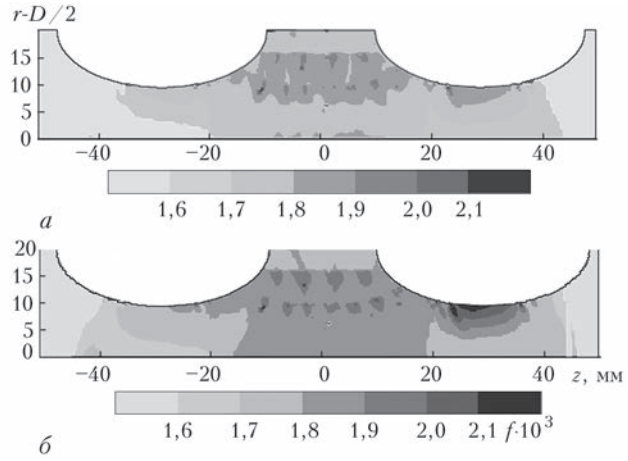


Рис. 7. Распределение поврежденности трубопровода в области множественного дефекта коррозионной потери металла (*a*×2*c* = 10 мм×40 мм, *L* = 60 мм) через 10 (*а*) и 1000 (*б*) циклов нагружения

ди зарождения пор вязкого разрушения. При этом, как показано на рис. 7, в области одного из дефектов формируется область высокой концентрации ДМ, что обусловлено асимметрией наложения валиков ремонтной наплавки (и, соответственно, более высокими остаточными напряжениями на периферии этого дефекта, см. рис. 4, *б*), а также формированием общей области поврежденности между дефектами утонения и участком ремонта с концентрацией пор $f > 1{,}8 \cdot 10^{-3}$.

Выводы

Разработан комплекс математических моделей и программных средств их реализации для численного прогнозирования совместных процессов термодеформирования и докритического разрушения металла ответственных сварных конструкций в условиях сварки и под действием переменного силового воздействия. Предложены критерии зарождения микро- и макроразрушения конструкции при пластическом течении материала по вязкому и хрупко-вязкому механизмам.

На основе результатов численного анализа накопления пластических деформаций в условиях ультрамалоциклового и малоциклового нагружения переменным внутренним давлением трубопроводного элемента с множественным коррозионным повреждением в области ремонтной наплавки показано, что наличие локальных геометрических концентраторов напряжений в области сварки существенно снижает стойкость к критическому разрушению металла под действием ультрамалоциклового нагружения. При этом зарождение разрушения происходит по тому же сценарию, что и в случае статического нагружения: докритическая поврежденность развивается в области сварки и распространяется на основной металл конструкции по мере накопления пластических деформаций и развития пористости вязкого разрушения.

Показано, что ослабленная ремонтной сваркой область при наличии на периферии множественных дефектов локальной потери металла способствует общему снижению жесткости стенки и формированию областей более высоких напряжений и, соответственно, более высокой концентрации пор вязкого разрушения в условиях циклического нагружения. Как результат, величина предельного количества циклов нагружения снижается более чем в 5 раз по сравнению с аналогичной конструкцией с одиночным дефектом в области монтажной или ремонтной сварки.

1. Lam C. Statistical Analyses of Incidents on Onshore Gas Transmission Pipelines Based on PHMSA Database / C. Lam, W. Zhou // Pressure Vessels and Piping. – 2016. – № 6. – P. 1–56.
2. Best practice for risk based inspection as a part of plant integrity management. Contract research report 363/2001 / B. Wintle, B. W. Kenzie, G. J. Amphlett [et al.]. – Merseyside: Health and Safety Executive, 2003. – 186 p.
3. Escoe A. K. Piping and pipelines. Assessment Guide / A. K. Escoe. – Texas: Gulf Professional Publishing, 2006. – 555 p.

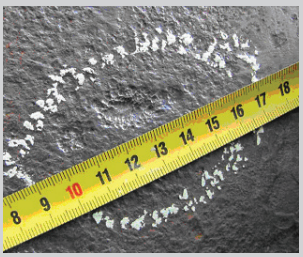
4. Kondo D. Basic concepts and models in continuum damage mechanics / D. Kondo, H. Welemane, F. Cormery // Revue europeenne de genie civil. – 2007. – Vol. 11, № 7–8. – P. 927–943.
5. Klingbeil D. Gurson-based modeling of ductile damage and failure during cyclic loading processes at large deformation / D. Klingbeil, B. Svendsen, F. Reusch. // Engineering Fracture Mechanics. – 2016. –Vol. 160. – P. 95–123.
6. Portnykh I. A. Characteristics of radiation porosity and structural phase state of reactor austenitic 07C–16Cr–19Ni–2Mo–2Mn–Ti–Si–V–P–B Steel after neutron irradiation at a temperature of 440 ... 600 °C to damaging doses of 36–94 dpa / I. A. Portnykh, V. L. Panchenko. // The Physics of Metals and Metallography. – 2016. – Vol. 117, Is. 6. – P. 611–623.
7. Fitness-for-Service. American Petroleum Institute. Recommended Practice 579. First edition. Washington: API Publications and Distribution, 2000. – 625 p.
8. ДСТУ-Н Б В.2.3-21:2008. Настанова. Визначення залишкової міцності магістральних трубопроводів з дефектами. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2008. – 91 с.
9. Оценка работоспособности магистрального трубопровода с локальным утонением стенки при ремонте дуговой наплавкой / Е. А. Великоиваненко, Г. Ф. Розынка, А. С. Миленин [и др.] // Автоматическая сварка. – 2015. – № 1. – С. 22–27.
10. Моделирование процессов зарождения и развития пор вязкого разрушения в сварных конструкциях / Е. А. Великоиваненко, Г. Ф. Розынка, А. С. Миленин [и др.] // Автоматическая сварка. – 2013. – № 9. – С. 26–31.
11. Jean Lemaitre Rodrigue Desmorat. Engineering Damage Mechanics. Ductile, Creep, Fatigue and Brittle Failures. – Berlin: Springer-Verlag, 2005. – 292 p.
12. Xue L. A unified expression for low cycle fatigue and extremely low cycle fatigue and its implication for monotonic loading / L. Xue // International Journal of Fatigue. – 2008. – Vol. 30. – P. 1691–1698.
13. Фролов В. Теория сварочных процессов / В. Фролов. – М.: Высшая школа, 1988. – 559 с.
14. Xue L. Constitutive modeling of void shearing effect in ductile fracture of porous materials / L. Xue // Engineering Fracture Mechanics – 2008. – № 75. – P. 3343–3366.
15. Needleman A. Void growth in an elastic-plastic medium / A. Needleman // Journal of Applied Mechanics. – 1972. – № 39. – P. 964–970.
16. Huh H. Crash-Worthiness Assessment of Thin-Walled Structures with the High-Strength Steel Sheet / H. Huh, W. J. Kang // Int. J. of Vehicle Design. – 2002. – Vol. 30, № 1–2. – P. 1–21.
17. Карзов Г. П. Физико-механическое моделирование процессов разрушения / Г. П. Карзов, Б. З. Марголин, В. А. Швецова. – СПб.: Политехника, 1993. – 391 с.
18. Махненко В. И. Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций / В. И. Махненко. – К.: Наукова думка, 1976. – 320 с.
19. Махненко В. И. Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций / В. И. Махненко. – К.: Наукова думка, 2006. – 618 с.
20. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике. Справочник; под ред. Б. Е. Неймарка. – М. – Л.: Энергия, 1967. – 240 с.

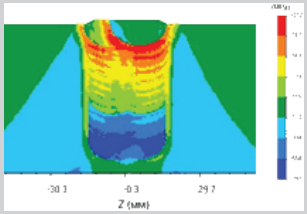
A set of mathematical models and their implementation software was developed for numerical prediction of joint processes of thermal deformation and subcritical fracture of metal in critical welded structures in welding and under variable force impact. Criteria of micro- and macrofracture initiation at plastic flow of material by ductile and brittle-ductile mechanisms are proposed. Features of initiation and propagation of subcritical fracture at low-cycle external force impact were studied in the case of pipeline elements with isolated and multiple defects of corrosion wall thinning in the area of erection (repair) welding. 20 References, 7 Figures.

K e y w o r d s : Subcritical damage, ductile fracture, ultralow-cycle and low-cycle fatigue, pipeline element, erection and repair welding

Поступила в редакцию
18.10.2016

Отдел «Математических методов исследования физико-химических процессов при сварке и спецэлектрометаллургии» Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины





предлагает следующие услуги в области технической диагностики ответственных конструкций и математического моделирования в сварке и родственных технологиях:

– моделирование напряженно-деформированного состояния сварных конструкций при монтажных и ремонтных работах, а также в процессе эксплуатации;
– экспертный анализ прочности и остаточного ресурса ответственных сварных конструкций по результатам неразрушающего контроля;
– создание инженерного проблемно-ориентированного программного обеспечения для моделирования технологических процессов и оценки работоспособности ответственных сварных конструкций;
– разработка необходимой конструкторской и технической документации.

За подробной информацией обращайтесь по телефону: +38 (044) 200-65-57; e-mail: d34@paton.kiev.ua

УДК 620.19.40

ДОСЛІДЖЕННЯ ВИХРОСТРУМОВИХ МЕТОДІВ ВИЯВЛЕННЯ ТА ОЦІНКИ ЗМІН СТРУКТУРИ ПІД ЧАС ШЛІФУВАННЯ ВИРОБІВ ІЗ ТЕПЛОСТІЙКОЇ СТАЛІ ВКС-5

В. М. УЧАНІН[1], М. В. СИДОРЕНКО[2]

[1]Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України. 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5.
E-mail: uchanin@ipm.lviv.ua

[2]Запорізький національний технічний університет. 69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64.
E-mail: sip80@inbox.ru

Розглянуто проблему виявлення та оцінки шліфувальних припалювань сталевих виробів. Запропоновано спосіб виготовлення зразків зі шліфувальними припалюваннями різної глибини на основі варіації режимів шліфування. Проведено дослідження зразків із теплостійкої сталі ВКС-5 із припалюваннями загартовування з товщиною від 2…3 до 100 мкм. Використано два вихрострумові методи, побудовані на застосуванні підвищених робочих частот (200 МГц) і визначенні змін імпедансу вихрострумового перетворювача в діапазоні робочих частот від 5,9 до 8 МГц (змінно-частотний метод). Показано кореляційні залежності показів приладів від товщини припалювання загартовування. Підтверджено високу чутливість вихрострумового методу до припалювань загартовування, особливо в випадку використання підвищених робочих частот. Сформульовано напрямки подальших досліджень. Бібліогр. 24, рис. 8.

Ключові слова: шліфувальні припалювання, вихрострумовий метод, вихрострумовий перетворювач

Стан проблеми. Зубчасті колеса авіаційних двигунів відносяться до їх найскладніших і найвідповідальніших елементів. Їх експлуатаційні характеристики залежать від точності виготовлення і якості робочих поверхонь, що працюють за умов великих контактних напружень, дії сил тертя і температури [1]. До найбільш складних операцій при їх виготовленні відносяться нарізування, хіміко-термічна обробка і шліфування зубів. Хіміко-термічна обробка передбачає газову цементацію, яка призводить до деформацій і значного зменшення точності виготовлення коліс. Для оптимального профілювання зубчастих коліс процес їх виготовлення завершують шліфуванням робочої поверхні зубів. Процес шліфування може призводити до структурних змін поверхневих шарів (припалювань) і залишкових напружень розтягу, які понижують експлуатаційні властивості виробів через зміни фізико-механічних властивостей матеріалу. Причиною припалювань є високі локальні температури в зоні різання, які за певних умов можуть перевищувати температури структурних і фазових перетворень [1,2]. Аналогічні проблеми можуть виникати в інших галузях машинобудування.

Особливістю термічного режиму шліфування є короткотерміновий нагрів з наступним швидким охолодженням внаслідок відведення теплоти вглиб металу. Процеси структурно-фазових перетворень при цьому визначаються режимами різання, діаграмою стану і теплофізичними характеристиками сталі. Під час нагріву вище певної критичної температури починає перестроюватися кристалічна гратка з утворенням аустеніту. За звичайних умов охолодження аустеніт перетворюється у мартенсит, що зазвичай спостерігається під час загартовування. Але за високої швидкості охолодження, характерної для процесів шліфування, мартенситне перетворення стримується, що призводить до фіксації значної частки утвореного аустеніту, який викликає припалювання вторинного загартовування. Крім припалювання вторинного загартовування розрізняють припалювання відпуску [3, 4]. Шар припалювання вторинного загартовування має підвищену твердість і процентний вміст аустеніту. Але існують і складніші багатошарові структури (припалювання змішаного типу [4]) – припалювання загартовування (вторинного) з відпуском. В цьому випадку шар вторинного загартовування розташований на м'якій основі відпущеного шару, який потім переходить у нормальну мартенситну структуру основного матеріалу [1, 3, 4]. Це відбувається, коли швидкість охолодження на певній глибині зменшується через зменшення перепаду температур. При цьому аустеніт не фіксується і формуються структури сорбіту або трооситу. В такому випадку загартований шар лежить на основі сильно відпущеного металу і руйнування загартованого шару під дією навантажень є особливо інтенсивним. Припалювання усіх видів зменшують міцність деталей, але припалювання загартовування вважаються більш небезпечними. Зокрема, припалювання зменшують витривалість зубчастих коліс. Випробування на стенді показали, що зубчасті колеса з припа-

© В. М. Учанін, М. В. Сидоренко, 2016

люваннями мають довговічність у 1,4…1,6 разів меншу ніж у зубчастих коліс без припалювань [1]. Це пояснюють дією факторів, що сприяють зародженню втомних тріщин.

Огляд методів контролю змін структури поверхневих шарів після шліфування. Для гарантування контактної витривалості зубчастих коліс важливо проводити оцінку структурного стану поверхневих шарів. Контроль зубчастих коліс на наявність припалювань (в тому числі у двигунобудуванні) здійснюють травленням в спеціальних реактивах [5]. До недоліків методу травлення можна віднести його якісний характер, суб'єктивність результатів контролю і погіршення якості поверхні після контролю. Для контролю структурних змін можна також використовувати метод рентгеноструктурного аналізу [6]. Але цей метод вимагає складного обладнання і є трудомістким [6]. Відомий також метод, побудований на вимірюванні контактної різниці потенціалів [7]. Але відомості про практичне використання цього методу відсутні.

До найперспективніших методів для аналізу змін структури поверхневих шарів сталі після шліфування слід віднести електромагнітні методи [8], зокрема, магнітошумовий (шумів Баркгаузена) [9] і вихрострумовий [10–15], які вже знайшли застосування в практиці НК.

Комплекс досліджень із застосування вихрострумового методу для контролю припалювань проведений на Пермському моторобудівному заводі [10–12]. Автори дослідили вплив параметрів припаленого шару, зокрема, кількість залишкового аустеніту (яка зростає зі збільшенням температури загартовування), на складові імпедансу вихрострумового перетворювача (ВСП). Показано, що зростання кількості аустеніту до 60 % призводить до суттєвого зменшення реактивної складової імпедансу ВСП, в той час як активна складова практично не змінюється. Очевидно, що це пов'язано зі зменшенням магнітної проникності матеріалу зі збільшенням кількості аустеніту, який має немагнітні властивості. Запропоновано спосіб вихрострумового контролю, який побудований на аналізі годографів сигналу ВСП в комплексній площині. Згідно цього способу, ВСП встановлюють на зразок, отриманий за оптимальних параметрів шліфування. Поворотом комплексної площини прилад настроюють таким чином, що сигнали від припалювань загартовування і відпустку будуть орієнтовані в різних квадрантах – першому і четвертому відповідно. Тобто, розглянутий спосіб дозволяє не тільки виявити припалювання, а і визначити його тип.

В роботі [13] представлено чотириканальну вихрострумову установку для виявлення припалювань на робочих поверхнях підшипників із сталі ШХ15СГ. Кожний канал складається із автогенератора з кварцевим резонатором (10 МГц) в колі зворотного зв'язку. Наявність неоднорідностей поверхневого шару (припалювань) під час сканування кілець виносним ВСП призводить до модуляції амплітуди високочастотних коливань. Обвідна високочастотних коливань виділяється амплітудним детектором і аналізується схемою амплітудного дискримінатора для формування сигналу індикації про наявність браку.

Дослідження по виявленню припалювань представлено на 19-й Світовій конференції з НК в Мюнхені [14, 15]. Зокрема, досліджено вигляд сигналів від локальних припалювань різного типу. Показано різницю між сигналами ВСП абсолютного і диференційного типу і проаналізовано вплив робочої частоти. Під час досліджень використано штучні припалювання, отримані за допомогою лазера [14]. Подано також результати експериментів по контролю колінчастих валів за допомогою контрольного автомату типу QuaSor E, який комплектували вихрострумовими приладами різного типу [14]. Зокрема, використовували прилад «Eddyvisor» від фірми «ibg Pruefcomputer GmbH» і дефектоскоп «ELOTEST BS 320» від фірми «Rohmann GmbH». Локальні припалювання також імітували за допомогою лазерної обробки. Зокрема, досліджували припалювання загартовування глибиною від 50 до 200 мкм. Найкращі результати для виявлення припалювання найменшої глибини були отримані за допомогою мультидиференційного ВСП на робочій частоті 1,7 МГц.

Досліджувана сталь і методика підготовки зразків. Досліджувались зразки із сталі ВКС–5 (16Х3НВФМБ-ІІІ), яка вважається найбільш раціонально легованою (хімічний склад, мас. %: 0,14…0,19 C; 0,4-0,7 Mn; 0,6…0,9 Si; 2,6…3,0 Cr; 1,0…1,5 Ni; 0,4…0,6 Mo; 1,0…1,4 W; 0,35…0,55 V; 0,10…0,20 Nb; Fe решта) і здатною тривалий час зберігати високу твердість (*HRC* 60…63) [1].

Різну товщину структурно зміненого шару на дослідницьких зразках отримували шляхом варіації режимів шліфування згідно способу [16].

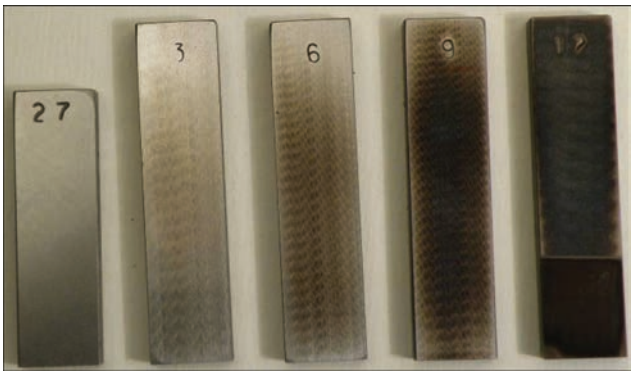


Рис. 1. Зовнішній вигляд зразків із сталі ВКС–5 з шліфувальними припалюваннями різної товщини

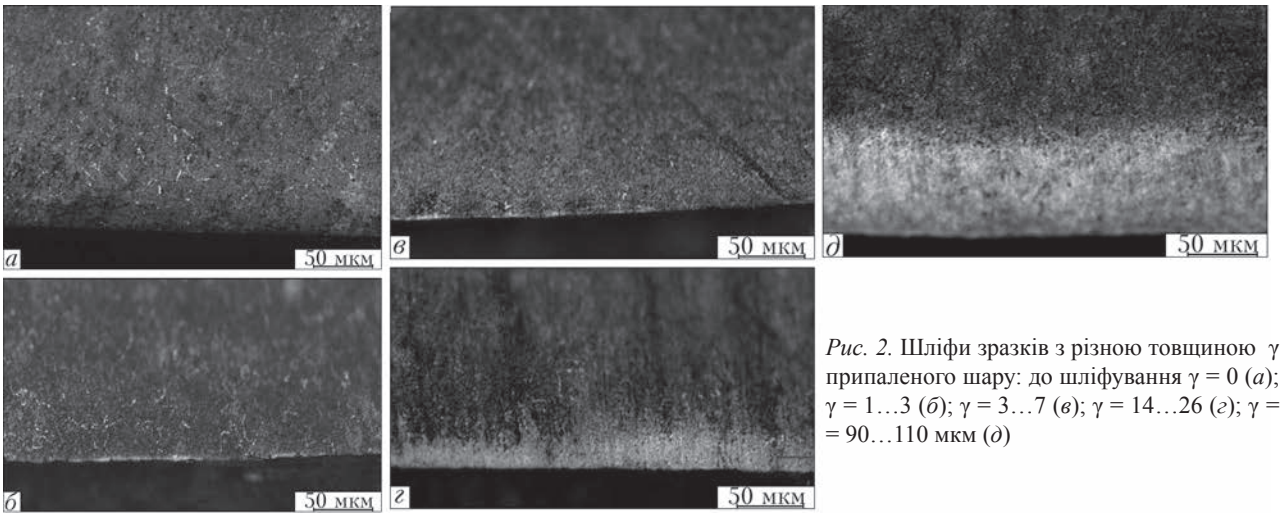


Рис. 2. Шліфи зразків з різною товщиною γ припаленого шару: до шліфування γ = 0 (*а*); γ = 1…3 (*б*); γ = 3…7 (*в*); γ = 14…26 (*г*); γ = = 90…110 мкм (*д*)

Для цього із сталі ВКС–5 були виготовлені заготовки у вигляді пластин розмірами 60×12×4 мм. Для створення припалювань використано шліфувальний станок 3Г71 з кругом із карбіду кремнію типу 64С F90 LV на мінімальній швидкості різання. Для отримання різного ступеня припалювань шліфування проводять за різної глибини різання δ – товщини поверхневого шару, яку знімають за один прохід. В нашому експерименті δ = 10,0; 20,0; 30,0 і 40 мкм. З частини заготовок були виготовлені поперечні шліфи, на яких за допомогою металографічного інвертованого мікроскопа Carl Zeiss Observer D1m були визначені товщини припалювань загартовування.

Зовнішній вигляд зразків з різною товщиною припаленого шару представлено на рис. 1. На рис. 2 представлено шліфи зразків з різною товщиною γ припалювання.

Товщини шліфувальних припалювань γ, мкм на дослідницьких зразках із сталі ВКС–5 (рис. 1): для № 27 – 0 (початковий стан); № 3 – 1…3; № 6 – 3…7; № 9 – 14…26; № 12 – 90…110.

В поверхневому шарі зразків можна спостерігати шліфувальні припалювання загартовування у вигляді білого шару (рис. 2). При цьому мінімальна товщина шару складає 1…3 мкм, а максимальна – близько 100 мкм. Товщина γ припаленого шару у різних січеннях зразків має деякий розкид. Спостерігається певна кореляційна залежність γ(δ) (рис. 3) товщини поверхневого припаленого шару γ від глибини різання δ – товщини поверхневого шару, що знімається за один прохід інструменту. Ця залежність може бути використана для отримання зразків із сталі ВКС–5 із заданою товщиною припалювання для калібрування і настроювання апаратури контролю [16]. Основною перевагою таких зразків порівняно із зразками, в яких припалювання формують за допомогою лазера [14, 15], є повна відповідність припалюванням на об'єктах контролю, а також можливість формування припалювань в широкому діапазоні заданої товщини. Крім того, товщину припалювань можна уточнити використанням статистичних підходів [17].

Апаратура для проведення досліджень. Для досліджень використовували два варіанти реалізації методу вихрострумової структуроскопії. Перший передбачає контроль матеріалів на підвищених робочих частотах, який, завдячуючи впливу скін-ефекту, забезпечує високу чутливість до змін електрофізичних параметрів в тонких поверхневих шарах. В іншому варіанті використано змінно-частотний метод, при якому зміни імпедансу ВСП визначали в діапазоні робочих частот.

Для кількісного вихрострумового контролю поверхневих шарів на підвищених частотах раніше запропоновано декілька технічних рішень [18–20], які реалізовано у вихрострумовому структуроскопі типу ВС-11ВЧ (АЛЬФА М) (рис. 4) [21]. Використовували варіант приладу, що працює в режимі зриву генерації на підвищеній робочій частоті 200 МГц у виносному автогенераторному ВСП з мініатюрною обмоткою діаметром 0,5 мм, що забезпечує максимальну чутливість до зміни електрофізичних властивостей тонкого поверхневого шару матеріалу [19]. В приладі реалізовано спосіб кількісної оцінки па-

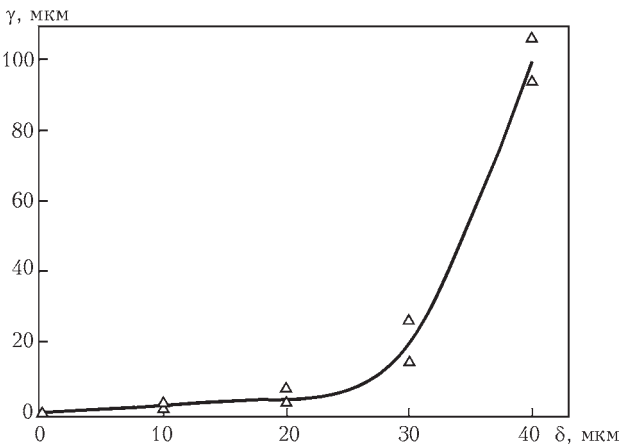


Рис. 3. Залежність товщини припаленого шару γ від глибини різання δ

Рис. 4. Вихрострумовий структуроскоп ВС-11ВЧ (АЛЬФА М)

Рис. 5. Комп'ютеризована вихрострумова система F-SECT

раметрів шарів шляхом реєстрації зміни граничних значень керуючої напруги виносного автогенераторного ВСП з діаметром обмотки 0,5 мм [20].

Для вимірювання модуля імпедансу параметричного ВСП змінно-частотним методом використовували вихрострумову систему F-SECT (рис. 5), розроблену італійською фірмою CESI для аналізу експлуатаційної деградації структури високотемпературних поверхневих шарів лопаток газових турбін [22, 23]. Прилад дозволяє реєструвати зміни імпедансу параметричного ВСП у вигляді тонкоплівкової спіралі в широкому діапазоні робочих частот.

Результати досліджень. Залежність показів вихрострумового структуроскопа типу ВС-11ВЧ (АЛЬФА М) на робочій частоті 200 МГц під час дослідження зразків зі шліфувальними припалюваннями загартовування товщиною від 3 до 100 мкм подано на рис. 6 [24]. Під час побудови залежностей використовували середнє значення товщини припалювання.

Видно, що застосування підвищеної робочої частоти 200 МГц призводить до високої чутливості до шліфувальних припалювань. Для кожного зразка існує розкид показів, що пов'язано з неоднорідністю товщини структурно зміненого стану на різних ділянках зразка (див. рис. 2). Але

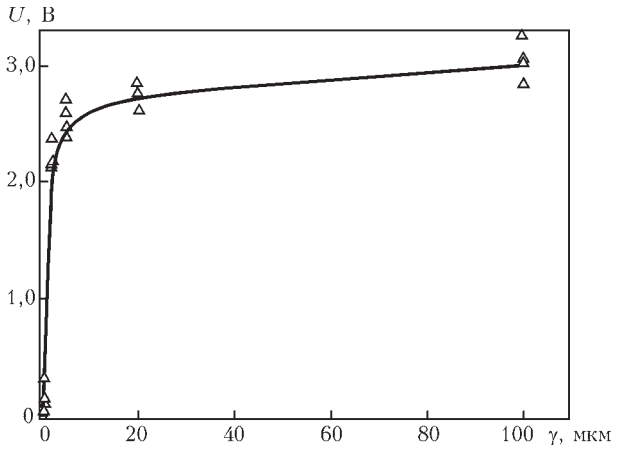


Рис. 6. Залежність показів структуроскопа ВС-11ВЧ від товщини припаленого шару γ

цей розкид незначний порівняно зі змінами показів приладу навіть для припалювання найменшої товщини (до 1…3 мкм). Така чутливість набагато перевищує чутливість, подану в роботах [14, 15], що пов'язано з набагато більшою робочою частотою в нашому експерименті. При цьому покази структуроскопа різко змінюються на початку діапазону змін товщини припаленого шару (до 7…10 мкм), після чого спостерігається певне насичення і покази структуроскопа в діапазоні від 7…10 мкм до 100 мкм змінюються на незначну величину. Такий характер залежності також можна пояснити сильним впливом скін-ефекту через нетрадиційно високу робочу частоту (200 МГц). Таким чином, існує статистична кореляція між показами структуроскопа і товщиною припалених шарів, що дозволяє стверджувати про можливість кількісної оцінки глибини припалювань загартовування (особливо в діапазоні малої товщини припалювання).

Під час досліджень змінно-частотним методом за допомогою вихрострумової системи F-SECT використовували 21 робочу частоту в діапазоні від 0,59 до 8,0 МГц. Реалізовано режим нормування імпедансу на кожній із використовуваних робочих частот. При цьому на кожній частоті приведений модуль імпедансу *Mod Z*' для зразка без припалювання після нормування відповідає нулю, а з припалюванням максимальної товщини 100 мкм дорівнює одиниці. Для інших зразків з проміжною товщиною припаленого шару приведений імпеданс за такого нормування буде знаходитися в діапазоні $0 < ModZ' < 1{,}0$. Результати досліджень представлено у вигляді частотної залежності модуля нормованого імпедансу *Mod Z*' для зразків з припаленим шаром різної товщини (рис. 7) і залежності модуля нормованого імпедансу *Mod Z*' від товщини припалювання для крайніх робочих частот діапазону 0,59 і 8,0 МГц (рис. 8).

Наведені результати (рис. 7, 8) показують надійну амплітудну дискримінацію сигналів за тов-

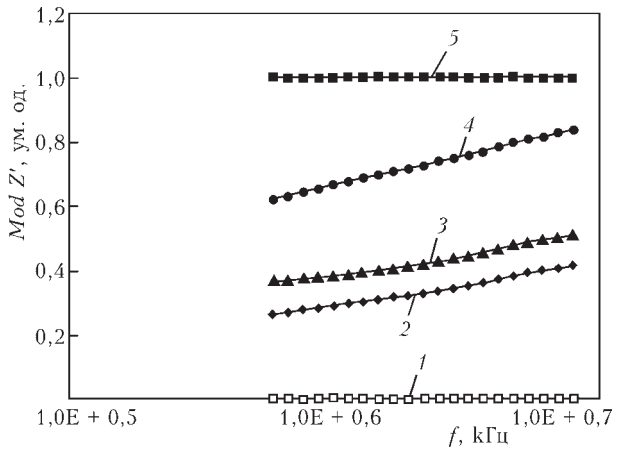


Рис. 7. Частотна залежність модуля нормованого імпедансу *Mod Z*' для зразків з різною товщиною γ припаленого шару: до шліфування γ = 0 (*1*);γ = 1…3 (*2*);γ = 3…7 (*3*);γ = = 14…26 (*4*); γ = 90…110 мкм (*5*)

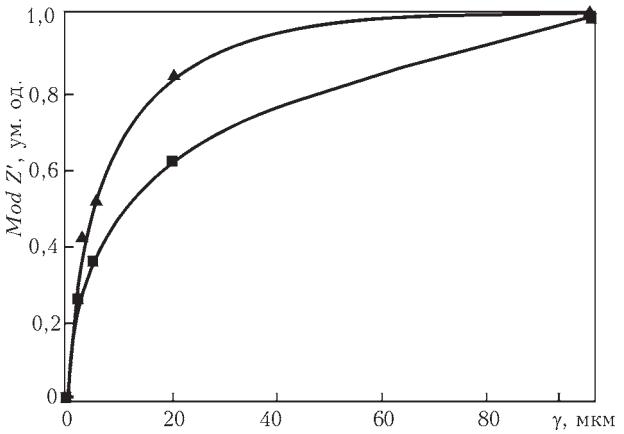


Рис. 8. Залежності модуля нормованого імпедансу *Mod Z*' від товщини припалювання для робочих частот 0,59 (*1*) і 8,0 (*2*) МГц

щиною припалювання загартовування на різних частотах від 0,59 до 8 МГц. Залежності модуля нормованого імпедансу на рис. 8 для робочих частот 0,59 і 8,0 МГц якісно подібні на залежність на рис. 6, що вказує на загальний характер отриманих закономірностей незалежно від варіанту реалізації вихрострумового методу. Відмінність полягає у меншій швидкості зміни сигналу на початковій ділянці діапазону зміни товщини припалювання на менших робочих частотах (рис. 8). Тут насичення настає пізніше і суттєві зміни модуля імпедансу відбуваються до товщини припалювання 20 мкм. Зміни модуля імпедансу при зміні глибини припалювання більш повільні для меншої робочої частоти 0,59 МГц.

Висновки

Наведені результати показали принципову можливість виявлення і оцінки товщини шліфувальних припалювань за допомогою вихрострумового методу. Зокрема, це стосується найбільш небезпечних припалювань загартовування. Завдячуючи невеликим розмірам ВСП можна досягнути високої локальності контролю. При цьому чутливість до припалювань малої глибини збільшується зі збільшення робочої частоти.

Методика виготовлення зразків з припалюваннями заданої глибини може бути реалізована шляхом варіації режимів шліфування на основі отриманих попередньо кореляційних залежностей.

Подальші дослідження передбачають розробку методів вихрострумового контролю, що забезпечують можливість визначення типу і параметрів припалювання шляхом аналізу сигналу ВСП в комплексній площині.

1. Производство зубчатых колес газотурбинных двигателей / Ю. С. Елисеев, В. В. Крымов, И. П. Нежурин [и др.]; под ред. Ю. С. Елисеева. – М.: Высшая школа, 2001. – 493 с.
2. Ящерицын П. И. Тепловые явления при шлифовании и свойства обработанных поверхностей / П. И. Ящерицын, А. К. Цокур, М. Л. Еременко. – Минск: Наука и техника, 1973. – 184 с.
3. Лебедев В. Г. Механизм образования прижогов при шлифовании деталей из закаленных сталей / В. Г. Лебедев, Н. Н. Клименко, С. А. Аль-Аджелат // Наукові нотатки. 2013. – Вип. 40. – С. 141–143.
4. Лебедев В. Г. Фазово-структурный состав поверхностных слоев деталей при шлифовании / В. Г. Лебедев, Е. А. Луговская // Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві. – 2015. – Вип. 3(8). – С. 204–212.
5. ISO 14104:2014. Gears – Surface temper etch inspection after grinding, chemical method, International Organization for Standardization, 2014. – 17 p.
6. А. с. 949440 СССР, МКИ G01N23/20. Способ определения поверхностных прижогов / М. А.Тихонов, А. П. Сарычев, И. С. Ульянов; опубл. 07.08.82, Бюл. № 29.
7. Пат. 2407996 Россия. Неразрушающий способ экспрессного выявления зон на поверхности металлических деталей со шлифовочными или эксплуатационными прижогами / Э. А. Кочаров, В. С. Олешко; опубл. 27.12.2010, Бюл. № 36.
8. Учанин В. Н. Оптимизация электромагнитного контроля поверхностных слоев зубчатых колес ГДТ, изготовленных из теплостойких сталей / В. Н. Учанин, М. В. Сидоренко, А. И. Вильчек // Доклады X Межд. научн.-техн. конф. «Прогрессивные технологии жизненного цикла авиационных двигателей и энергетических установок», Алушта: сборник тезисов докладов. – Запорожье: изд-во Запорожского национального технического ун-та, 2013. – С. 106–107.
9. Суоминен Л. Обнаружение дефектов шлифования деталей из ферромагнитных материалов с использованием эффекта Баркгаузена / Л. Суоминен // В мире неразрушающего контроля. – 2011. – № 2 (52). – С. 74–78.
10. Остапенко В. Д. Применение электроиндуктивного метода для оценки физического состояния шлифованной поверхности стали / В. Д. Остапенко, В. С. Гайдамакин, О. П. Чихачев // Дефектоскопия. – 1971. – № 5. – С. 56–61.
11. А. с. 3767II СССР, МКИ G01N27/86. Способ контроля качества шлифования ферромагнитных сталей / В. Д. Остапенко, В. С. Гайдамакин, О. П. Чихачев; опубл. 5.04.1973, Бюл. № 17.
12. Остапенко В. Д. Исследование возможности контроля качества шлифования закаленных сталей токовихревым методом / В. Д. Остапенко, В. С. Гайдамакин, О. П. Чихачев. – М.: Энергия, 1971. – 173 с.
13. Мельников И. В. Неразрушающий контроль поверхностных слоев рабочих поверхностей деталей подшипников / И. В. Мельников, Е. Н. Семенов, Р. К. Трушкевич // Сб. научных трудов ВНИИПП. – 1987. – Вып. 3. – С. 146–158.
14. Zösch A. Detection of Near Surface Damages in Crank Shafts by Using Eddy Current Testing / A. Zösch, Ch. Seidel, K. Härtel // 19th World Conf. on Non-Destructive Testing. – Munich. – 2016. – Access mode: www.ndt.net.

15. Härtel K. Various Approaches to Obtain an Eddy Current Signal in Case of Overheating / K. Härtel, A. Zösch, M. Seidel, Ch. Seidel // 19th World Conf. on Non-Destructive Testing. – Munich. – 2016. – Access mode: www.ndt.net.
16. Пат. 100738 Україна. МПК G01N27/90. Спосіб виготовлення зразків для настроювання приладів контролю змін структури під час шліфування поверхні / В. М. Учанін, М. В. Сидоренко; опубл. 10.08.2015, Бюл. № 15.
17. А. с. 1753394 СССР, МКИ G 01 N 27/90. Способ получения меры для поверки приборов неразрушающего контроля / В. Н. Учанин, Ю. В. Поздняков, Ю. Н. Агапов. – № 4733631/28; опубл. 07.08.92, Бюл. № 29.
18. Uchanin V. Elevated Frequencies in Eddy Currents – New Possibilities of Thin Surface Layer Evaluation / V. Uchanin // 15th World Conference on Nondestructive Testing. – Rome. – 2000. – Access mode: www.ndt.net.
19. А. с. 1785341 СССР, МКИ G 01 N 27/90. Вихретоковый преобразователь / В. Н. Учанин, Ю. С. Грабский, И. Г. Яковенко. – № 4851379/28; заявл. 16.07.90.
20. А. с. 1663525 СССР. МКИ G 01 N 27/90. Способ вихретокового контроля тонких поверхностных слоев / В. Н. Учанин, Н. П. Калинин, Ю. С. Грабский; опубл. Бюл. № 26.
21. Учанін В. М. Розробка методів та засобів контролю пошкодженості приповерхневих шарів виробів із титанових сплавів / В. М. Учанін, О. П. Осташ // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин. – Київ: ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України, 2006. – С. 578–582.
22. Antonelli G. Non-destructive condition assessment of serviced MCrAlY coatings / G. Antonelli // Turbine Forum: Nice-France, 2002.
23. Пат. 7175720 США, МКИ C21D1/55. Non-destructive testing method of determining the depletion of a coating / Schnell G., Antonelli K., Germerdonk (Швейцарія, Італія); – № 10/726542; заявл. 4.12.2003; опубл. 13.02.2007; НКИ 148/509. – 8 с.
24. Учанін В. М. Вихрострумовий метод виявлення та оцінки змін структури під час шліфування виробів із теплостійких сталей / В. М. Учанін, М. В. Сидоренко // Матеріали 7-ї Міжн. наук.-техн. конф. «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання». – Ів.-Франківськ: ІФНТУНГ, 2014. – С. 42–45.

The problem of detection and assessment of grinding burn marks in steel products is considered. A method is proposed to prepare samples with grinding burn marks of different depth, based on variation of grinding modes. Investigation of samples from heat-resistant steel VKS-5 with hardening burn marks of thickness from 2…3 to 100 ~m was conducted. Two eddy current methods, which are based on application of higher working frequencies (200 MHz), were used, and changes of impedance of eddy current converter in working frequency range from 5.9 to 8 MHz (variable frequency method) were determined. Correlation dependencies of instrument readings on hardening burn mark thickness are shown. High sensitivity of eddy current method to hardening burn marks was confirmed, particularly in the case of application of higher working frequencies. Directions of further studies were defined. 24 References, 8 Figures.

Надійшла до редакції
02.08.2016

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

Международная конференция
СВАРКА И РОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ — СЕГОДНЯ И В БУДУЩЕМ

Посвящается 100-летию Национальной академии наук Украины

5–6 декабря 2018 г. г. Киев

Научные направления конференции

- Технологии, материалы и оборудование для сварки и родственных процессов
- Прочность сварных конструкций, теоретические и экспериментальные исследования напряженно-деформированных состояний
- Усовершенствование сварных конструкций, автоматизация их расчетов и проектирования, оценка и продление ресурса
- Новые конструкционные материалы
- Неразрушающий контроль и техническая диагностика
- Инженерия поверхности
- Сварка в медицине — технологии, оборудование; наноматериалы и нанотехнологии
- Проблемы экологии сварочного производства
- Специальная электрометаллургия
- Стандартизация, сертификация продукции сварочного производства; подготовка и аттестация специалистов

Тезисы докладов направлять **до 01.11.2017 г.** в адрес оргкомитета:
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com

УДК 620.191.33

ЕКСПЕРТНА СИСТЕМА ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТА ОЦІНКИ РИЗИКУ РУЙНУВАННЯ НАЗЕМНИХ ДІЛЯНОК ТРИВАЛО ЕКСПЛУАТОВАНИХ ГАЗОПРОВОДІВ

І. М. ДМИТРАХ, А. М. СИРОТЮК, О. Л. БІЛИЙ, Р. А. БАРНА, О. Л. ЛУТИЦЬКИЙ
Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України. 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5.
E-mail: syrotyuk@ipm.lviv.ua

Розроблено діючий зразок портативного переносного діагностично-експертного комплексу, який включає засоби неруйнівного контролю (ультразвуковий дефектоскоп) та комп'ютерну експертну систему для оцінювання ризику руйнування та прогнозування можливості подальшої експлуатації наземних ділянок тривало експлуатованих газопроводів з корозійними та тріщиноподібними дефектами. Основу комп'ютерної експертної програми складає спеціальна діаграма в координатах «критичні значення глибини тріщиноподібних дефектів – форма дефекту», яка базується на критеріях механіки руйнування матеріалів з врахуванням впливу робочих агресивних середовищ. Запропонована розробка дозволяє безпосередньо на місці проведення діагностики зробити науково обґрунтовані експертні висновки про ризик руйнування та безпечну експлуатацію дефектного елемента трубопроводу. Бібліогр 14, рис. 6.

Ключові слова: наземні ділянки газопроводів, корозійні та тріщиноподібні дефекти, ультразвукова дефектоскопія, комп'ютерна експертна система, критичні розміри дефектів, діаграма оцінювання роботоздатності дефектного трубопроводу

Розроблення сучасних технічних засобів оцінювання міцності, ризику руйнування та залишкового ресурсу дефектних елементів відповідальних трубопровідних систем тривалої експлуатації, зокрема і наземних ділянок газопроводів, є актуальною проблемою для вітчизняної інженерної практики [1–3]. Основною ідеєю даної роботи є реалізація можливості обґрунтованих експертних висновків про ризик руйнування та безпечну експлуатацію елемента трубопроводу безпосередньо на місці його діагностики. Наукову ідеологію розробки складають підходи механіки руйнування, зокрема, концепція порогових (безпечних) та критичних розмірів дефектів та запропонована авторами методика побудови діаграм оцінювання роботоздатності дефектного трубопроводу [4].

Діагностично-експертний комплекс. Розроблено діючий зразок портативного переносного діагностично-експертного комплексу, який конструктивно складається із ультразвукового дефектоскопа УД4-76 із набором давачів та портативного комп'ютера.

Моніторинг технічного стану та прогнозування можливого ризику руйнування елемента трубопроводу за допомогою діагностично-експертного комплексу здійснюється в наступній послідовності (рис. 1): діагностування елементу труби дефектоскопом УД4-76 з системою давачів; автоматизований комп'ютерний аналіз отриманих даних про дефектність труби за запропонованими критеріями механіки руйнування матеріалів; формування експертного висновку про стан діагностованої ділянки трубопроводу та рекомендацій щодо подальшої її експлуатації.

У діагностично-експертному комплексі передбачено вибір та опрацювання результатів дефектоскопії ультразвуковими методами залежно від особливостей конструктивних елементів, а також умов їх експлуатації. Для прикладу, для тонкостінних трубопроводів перш за все увага звертається на процеси утворення корозійно-механічних виразок та зародження макротріщини. Водночас, для труб із товщиною стінки в декілька десятків міліметрів залишкову довговічність буде визначати стадія розвитку макротріщини в глибину стінки труби [4].

Основою для отримання первинних даних про стан контрольованих об'єктів є неруйнівне ультразвукове діагностування елемента трубопроводу. Слід зауважити, що сучасні цифрові ультразвукові дефектоскопи є портативними і дозволяють виконувати роботи в польових умовах без виведення трубопроводів з експлуатації. Тому, як основне джерело отримання інформації про дефекти трубопроводу обрано дефектоскоп УД4-76 [5]. Дефектоскоп УД4-76 має ряд програмних інструментів, які дозволяють оперативно, за даними дефектоскопії оцінити розміри дефектів та визначити їхнє розміщення.

Важливою характеристикою дефектоскопу є можливість його підключення до персонального, зокрема портативного, комп'ютера. Це дозволяє автоматично переносити результати сканування

© І. М. Дмитрах, А. М. Сиротюк, О. Л. Білий, Р. А. Барна, О. Л. Лутицький, 2016

Рис. 1. Схема технічної діагностики та оцінки ризику руйнування елемента трубопроводу

в комп'ютер зі збереженням їх у централізованій базі даних з метою подальшого аналізу та обробки. Маючи в своєму розпорядженні результати вимірювань та аналізу, отримані у різні моменти часу впродовж деякого періоду моніторингу об'єктів, оператор може відслідковувати зміни характеристик та стану конструкції в часі, що дозволяє прогнозувати розвиток процесів деградації та тривалість збереження робочих властивостей тих чи інших ділянок, а також конструкції в цілому.

Комп'ютерна експертна програма для оцінювання працездатності та можливості подальшої безпечної експлуатації дефектних трубопроводів. Основою експертної системи є програмний продукт, побудований на базі оригінальних, розроблених у Фізико-механічному інституті ім. Г. В. Карпенка НАН України, алгоритмів та методів механіки руйнування матеріалів [4, 6, 7]. Він дозволяє за результатами автоматизованої обробки даних ультразвукових обстежень та визначення розмірів і розміщення дефектів здійснювати розрахункове оцінювання ступеня критичності дефектів і формувати на цій основі експертні висновки та рекомендації щодо можливості подальшої безпечної експлуатації трубопроводу чи його окремих ділянок [4, 8].

Основними параметрами для чисельного оцінювання міцності та довговічності є характеристики циклічної (втомної) тріщиностійкості матеріалів трубопроводів [4, 9]. За експериментальними даними будують базові діаграми циклічної тріщиностійкості – залежності швидкості росту корозійно-втомної тріщини dc/dN від параметра ΔK_I. Такі діаграми обмежують двома граничними значеннями: нижнім ΔK_{th}, яке відповідає значенню ΔK_I, при якому не відбувається ріст корозійно-втомної тріщини, і верхнім ΔK_{fc} – при якому настає спонтанний (катастрофічний) ріст тріщини.

Для сталей трубопроводів базові діаграми циклічної тріщиностійкості мають вигляд прямолінійних ділянок у подвійній логарифмічній системі координат, кожна з яких описана степеневою залежністю типу Паріса $dc/dN = C(\Delta K_I)^n$, де C і n – константи, що характеризують систему «матеріал–середовище».

Для внесення тріщиноподібного дефекту у стінці трубопроводу з внутрішнім діаметром d та товщиною t у процес моделювання [4, 10] він описується півеліптичною тріщиною із розмірами півосей a та c.

Тут вважають, що зі збільшенням циклів навантаження N дефект розвивається, зберігаючи півеліптичну форму, при цьому співвідношення півосей a та c є величиною змінною, тобто $c/a = f(C_m, N)$ і залежить від системи «матеріал–середовище», що характеризується деякими сталими C_m.

Опір поширенню тріщини як в напрямку півосі c, так і в напрямку півосі a, повністю визначається діаграмою циклічної тріщиностійкості металу трубопроводу, одержаною за заданих експлуатаційних умов, яку аналітично описують степеневою залежністю $dc/dN = C(\Delta K)^n$ чи $da/dN = C(\Delta K)^n$.

Такі модельні (еквівалентні) тріщини є об'єктом подальшого оцінювання за підходами механіки руйнування. Для цього використовують наступні критерії.

Критерій безпечної експлуатації за пороговою глибиною тріщини. Оцінку корозійно-механічних дефектів тріщиноподібного типу за критерієм порогової глибини c_{th} та форми c/a напівеліптичної тріщини здійснювали на основі її взаємозв'язку з пороговими значеннями КІН ΔK_{th}. Це дає змогу, враховуючи експериментальні дані про циклічну тріщиностійкість матеріалу труби та дані діагностики стану трубопроводів (тобто розміри та форму тріщин), оцінити потенційну можливість розвитку тріщин за подальшої експлуатації, а також ступінь ризику руйнування трубопроводу.

В данному випадку під пороговим розміром тріщини вважали напівеліптичну тріщину фіксованої форми (c/a) та глибиною $c = c_{th}$, у вершині якої КІН рівний пороговому $(K_I = K_{th})$. Таким чином, критерієм безпечного тріщиноподібного дефекту буде умова $c \le c_{th}(K_{th})$ при $(c/a) = \text{const}$.

Тобто, всі виявлені при діагностичному огляді дефекти глибиною $c \le c_{th}$ вважаються безпечними, оскільки не мають потенційної здатності до подальшого розвитку.

Критерій безпечної експлуатації трубопроводу за граничною швидкістю росту наявних тріщин. Розглянуто випадок розрахунку допустимої глибини c_* тріщини для забезпечення безаварій-

ної роботи трубопроводу між двома черговими профілактичними оглядами. Його пропонується здійснювати за критерієм приросту Δc виявленого тріщиноподібного дефекта глибиною c_0, тобто $\Delta c \le \Delta c_*$ при $\Delta N = \Delta N_*$, де Δc_* – допустимий приріст тріщини в глибину; ΔN_* – планова кількість циклів навантаження впродовж експлуатації трубопроводу між двома профілактичними оглядами.

Фізично це означає оцінювання за деякою граничною швидкістю $(dc/dN)_*$ розвитку корозійно-втомної тріщини впродовж запланованого терміну експлуатації трубопроводу $dc/dN \le (dc/dN)_*$.

Так, наприклад, якщо виберемо значення $(dc/dN)_* = 10^{-4}$ мм/цикл, то це означає, що наявні в трубопроводі тріщини глибиною c_i можуть максимально розвинутись на 1 мм впродовж 10000 циклів навантаження.

Процедура визначення допустимої глибини тріщини c_* у стінці трубопроводу при заданих значеннях Δc_* та ΔN_* наступна. Спочатку визначають граничну швидкість росту корозійно-втомної тріщини $(dc/dN)_*$ як $(dc/dN)_* = \Delta c_*/\Delta N_*$. За цією величиною з діаграми циклічної тріщиностійкості матеріалу, що розглядають, визначають відповідне значення розмаху КІН ΔK_*. На основі цього значення розраховують допустиму глибину тріщини c_* із відомої формули [9] для підрахунку КІН ΔK_I, яка є функцією робочого навантаження на трубопровід, його геометричних розмірів та геометрії тріщиноподібного дефекту.

Оцінка ризику крихкого катастрофічного руйнування. Така оцінка здійснюється за відомим критерієм механіки крихкого руйнування ($K_I \le K_{fc}$) [9], де K_{fc} – циклічна в'язкість руйнування. Тут під критичним розміром тріщини розуміють напівеліптичну тріщину фіксованої форми c/a та глибиною $c = c_{fc}$, у вершині якої КІН рівний критичному, тобто $K_I = K_{fc}$.

Таким чином, критерієм критичного тріщиноподібного дефекту буде умова $c \le c_{fc}\,(K_{fc})$ при $(c/a) = \text{const}$.

Тобто, усі виявлені при діагностичному огляді дефекти глибиною, близькою до значення c_{th}, є критично небезпечними, оскільки мають потенційну здатність до спонтанного поширення, що може призвести до катастрофічного руйнування трубопроводу.

Діаграма оцінки роботоздатності та ризику руйнування трубопроводу з тріщиноподібними дефектами. Експертні оцінки можливого ризику руйнування трубопроводів, які знаходяться під дією пульсуючого тиску робочого середовища, можуть бути здійснені на підставі критеріїв, викладених вище.

Для цього на їх основі для кожного розглядуваного трубопроводу будують спеціальні діаграми в координатах «характеристичні значення глибини тріщиноподібних дефектів – форма дефекту» (рис. 2). Така діаграма містить три характерні зони.

Перша зона – це зона безпечної експлуатації трубопроводу, що знаходиться нижче кривої $c_{th} = F_1\,(c/a)$. Це стосується випадку, коли глибина всіх виявлених при діагностичному огляді дефектів є меншою за порогове значення, тобто $c \le c_{th}$. Такі дефекти вважають безпечними, оскільки вони не мають потенційної здатності до подальшого розвитку.

Друга зона – це зона експлуатації з прогнозованим розвитком наявних тріщиноподібних дефектів. Це означає, що впродовж певного запланованого терміну експлуатації трубопроводу допускається розвиток існуючих тріщин зі швидкістю, що не перевищує деяку встановлену граничну, тобто $dc/dN \le (dc/dN)_*$. Значення $(dc/dN)_*$ вибирають відповідно технічним нормам експлуатації трубопроводу, а також конкретної виробничої ситуації.

За вибраним значенням граничної швидкості $(dc/dN)_*$ розраховують криву $c_* = F_2\,(c/a)$. Всі наявні в трубопроводі тріщиноподібні дефекти глибиною $c_i \le c_*$ розвиватимуться зі швидкістю нижче граничної і можуть вважатись умовно безпечними для даного випадку.

Третя зона – зона ризику крихкого руйнування, яка знаходиться вище кривої $c_{fc} = F_3\,(c/a)$. Тобто для всіх виявлених при діагностичному огляді дефектів глибиною $c_i \ge c_{fc}$ реалізується критерій катастрофічного руйнування і експлуатація трубопроводу з такими дефектами недопустима.

Після накладання на діаграму (рис. 2) точок, які відповідають виявленим дефектам, можна чітко і однозначно встановлювати характер небезпечності кожного дефекту за місцем його розташування у характерних зонах діаграми.

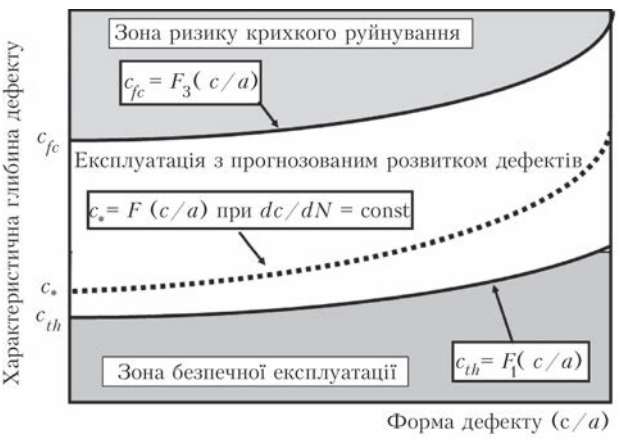


Рис. 2. Діаграма оцінки роботоздатності та ризику руйнування трубопроводу з тріщиноподібними дефектами

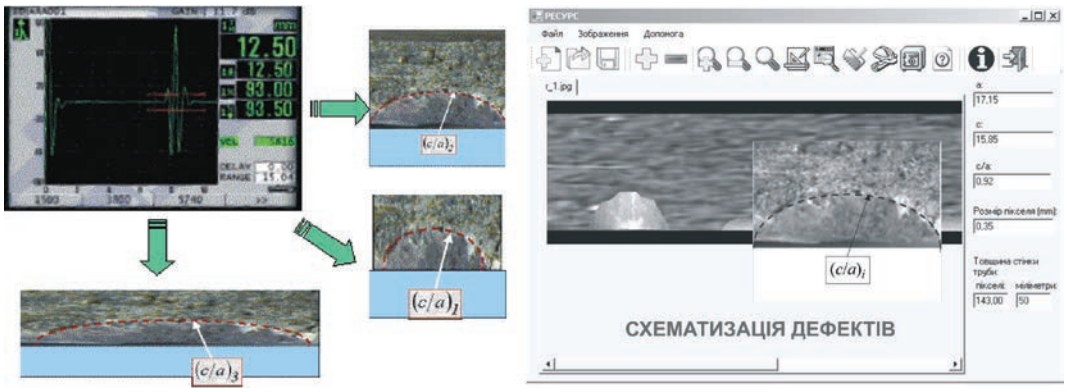


Рис. 3. Схематизація кожного дефекту еквівалентною півеліптичною тріщиною зі співвідношенням півосей $(c/a)_i$

Якщо дефект розташований в області, яка знаходиться нижче кривої $c_{th} = F_1(c/a)$, то такий дефект вважають безпечним, і який не має потенційної здатності до подальшого розвитку. Дана зона містить дефекти, глибина яких є меншою за порогове значення $c \le c_{th}$.

У другій зоні розміщені дефекти, які вважають умовно безпечними. Для них допускається розвиток та ріст у глибину, але зі швидкістю меншою за деяке встановлене граничне значення $dc/dN \le (dc/dN)_*$, яке вибирають згідно умов та норм експлуатації трубопроводу. За вибраним значенням граничної швидкості $(dc/dN)_*$ розраховують криву $c_* = F_2(c/a)$. Дефекти даної зони мають глибину $c_i \le c_*$ і будуть розвиватись зі швидкістю нижче граничної, тобто, що за вказаний термін експлуатації вони не досягнуть критичного розміру.

Якщо ж дефект трубопроводу попадає у третю зону – зону крихкого руйнування, тоді подальша експлуатація труби є недопустима, оскільки такі дефекти у будь-який момент можуть різко збільшитися, що призведе до руйнування труби.

Викладені вище критерії складають основу *експертної комп'ютерної програми* для оцінки працездатності та ризику руйнування трубопроводу. Програма складається з п'яти взаємопов'язаних блоків (вікон): головне (стартове) вікно; база даних про газопровід; база даних тріщиноподібних дефектів, виявлених під час діагностичного огляду газопроводу; розрахункове вікно програми; вікно побудови діаграм оцінки роботоздатності дефектного трубопроводу.

Окрім цього, для спрощення процесу введення даних про дефекти трубопроводу у програмну підсистему вмонтовано програмний блок автоматизованого аналізу даних дефектоскопу, виділення та опрацювання у них областей, які несуть інформацію про дефекти. Блок обробки даних вимірювань дефектоскопу отримує дані, проводить їхню попередню обробку з видаленням шумових складових, у автоматизованому режимі виділяє області з великим рівнем сигналу, обраховує їхні геометричні параметри, проводить апроксимацію та передає інформацію у підсистему моделювання (рис. 3).

Тут здійснюється (рис. 3) схематизація кожного дефекту еквівалентною півеліптичною тріщиною зі співвідношенням півосей $(c/a)_i$. Функціональна база вікна реалізована за допомогою мови CLR (Common Language Runtime) – це компонент пакета Microsoft.NET Framework, віртуальна машина, на якій виконують всі мови платформи NET Framework. У підсумку дефектність трубопроводу подають як сукупність півеліптичних тріщин розмірами $(c/a)_i$. Ці дані програма використовує для експертного розрахункового оцінювання працездатності розглядуваного дефектного трубопроводу. Слід зауважити, що відповідно до термінів діагностичних оглядів трубопроводів база даних тріщиноподібних дефектів постійно доповнюється і, таким чином, у програмі зберігається вся історія пошкоджуваності ділянок трубопроводу впродовж його тривалої експлуатації.

Головне розрахункове вікно програми для чисельної оцінки допустимої глибини тріщиноподібних дефектів у стінках газопроводу є багатофункціональним (рис. 4). Тут, в першу чергу, задаються параметри трубопровода: товщина стінки, зовнішній діаметр, тиск середовища та коефіцієнт овальності, який визначає розташування дефекту (прямолінійна ділянка або згин). Критеріальні параметри можна задавати вручну або користуватися вбудованою базою, що міститься в експертній системі. Це стосується всіх трьох кри-

Рис. 4. Головне розрахункове вікно експертної системи

теріїв, за якими розраховують допустиму чи критичну глибину дефекта, а також ту, яка дає можливість оцінити, на якій стадії необхідні оглядові роботи на об'єкті.

Слід зауважити, що система оцінює як глибину одиничного дефекта, тобто на виході одержимо порогову глибину дефекту c_{th}, глибину дефекту при деякій фіксованій швидкості його росту $dc/dN = 10^{-m}$ мм/цикл і критичну його глибину c_{fc}, так і потенційну небезпеку сукупності дефектів, виявлених на об'єкті. Для кожного розглядуваного трубопроводу і заданих умов його експлуатації програма розраховує відповідну діаграму оцінки працездатності та ризику його руйнування (див. рис. 4). На таку діаграму автоматично наносяться дані про дефектність трубопроводу як сукупність півеліптичних тріщин розмірами $(c / a)_i$. Підсумкова діаграма (рис. 5) є базисом для кінцевого експертного висновку про працездатність та потенційний ризик руйнування кожної ділянки трубопроводу. При цьому в програмі враховують зміну таких параметрів: фактичного стану металу на даній ділянці газопроводу; реального складу робочого середовища; геометричних розмірів конструктивного елемента; специфіки експлуатаційних навантажень; форми тріщиноподібного дефекта та місця його розташування у трубопроводі.

Вплив експлуатаційних чинників на пошкоджуваність газопроводів. Під час тривалої експлуатації газопроводи зазнають впливу зовнішнього та внутрішнього корозійного середовища, а також режимів експлуатації (періодичної зміни тиску, температурних впливів, зсувів ґрунту тощо) [10, 11]. Численними дослідженнями доведено, що руйнування елементів газопроводів під впливом сумісної дії механічних навантажень та робочих корозійних середовищ обумовлене рядом фізико-хімічних локалізованих процесів утворення та розвитку на поверхнях труб локальної корозії (пітинги, корозійні виразки). При цьому поряд з місцями підвищеної концентрації напружень (отвори, вирізи, щілини та інші технологічні та конструктивні концентратори напружень), ці процеси часто виникають і на гладких деформованих поверхнях, що зумовлено гетерогенністю їх фізико-хімічного стану [9]. Ці первинні корозійно-механічні пошкодження під час експлуатації є джерелом накопичення необоротних мікропластичних деформацій. Саме на поверхні цих тріщиноподібних дефектів зароджуються мікротріщини, які, розвиваючись, утворюють макротріщину,

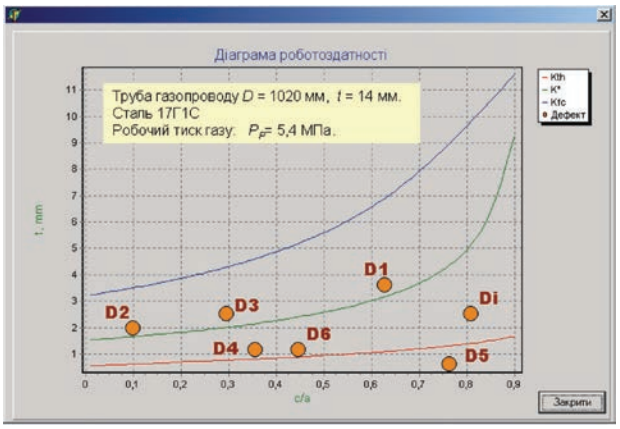


Рис. 5. Приклад оцінки працездатності трубопроводу за аналізом виявлених дефектів*

стабільне поширення якої у глибину стінки труби призводить до її спонтанного руйнування [2].

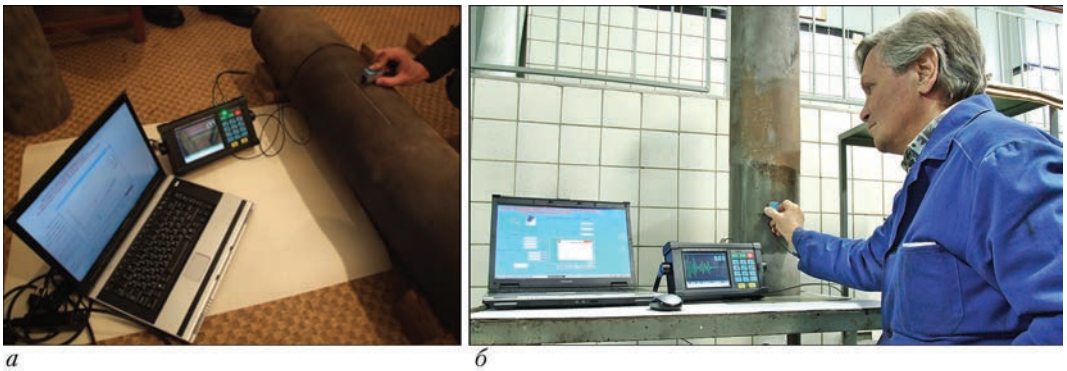
Таким чином, аварійні ситуації на магістральних газопроводах виникають внаслідок корозії зовнішньої і внутрішньої поверхонь труби [2, 12, 13]. Корозійні середовища, які впливають на зовнішнє руйнування поверхні труби, здебільшого мають слабокислий характер (pH 6,0), і тільки на ділянках зрошувальних земель, із сильно заболоченими та торф'яними ґрунтами, заплавах річок їх корозійна активність різко зростає (pH 2,6…2,9). Ґрунтова корозія [2] металів труб характеризується виразковим корозійним руйнуванням внаслідок виникнення макрокорозійних пар через кисневу проникливість на окремих ділянках ґрунту. Причому швидкість локальної чи пітингової корозії може бути у 10 раз вищою, ніж загальної, і становить 0,25…0,30 мм/рік. Внутрішня корозія визначається специфікою продуктів, що транспортуються [2].

Крім того, на трубопроводах, термін експлуатації яких становить 20 і більше років, є загроза корозійного розтріскування металу труби [2, 12], причому як в слаболужному – pH 7,5…9,0 (класичне розтріскування), так і в слабокислому – pH 5,5…7,0 (некласичне розтріскування) корозивних середовищах.

Специфіка експлуатації газопроводів [2] полягає в тому, що тиск газу змінюється по довжині трубопроводу і в часі, зумовлюючи втомні навантаження в результаті нерівномірного споживання і відбору, включення і виключення компресорних і насосних агрегатів, перекриття запірних пристроїв. Такі зміни тиску для газопроводів складають близько 20 %.

Вплив таких корозійно-втомних навантажень визначають за підходами механіки руйнування в

* Магістральний газопровід «Київ – Західна Україна»: D = 1020 мм, t = 14 мм. Сталь 17Г1С (σ_B=562,5 МПа, $\sigma_{0,2}$=357,5 МПа, δ = 27 %). Максимальний робочий тиск газу: P_p = 5,4 МПа. Термін експлуатації – 41 рік. Дані про дефектність вказаного трубопроводу надані співробітниками Івано-Франківського національного технічного університету нафти та газу



а *б*

Рис. 6. Тестування лабораторного зразка експертної системи на елементах труб з дефектами

корозійних середовищах [7, 9], в рамках якої характеристики корозійної тріщиностійкості конструкційних матеріалів розглядають як найбільш адекватну основу для оцінки фізико-хімічного стану та залишкового ресурсу дефектних трубопроводів у заданих експлуатаційних умовах.

На основі проведених випробувань побудовано діаграми циклічної корозійної тріщиностійкості для досліджуваних систем «матеріал–середовище», які дають можливість прогнозувати залишковий ресурс газопроводів та інтерпретувати виявлені методами технічної діагностики корозійно-втомні дефекти [2, 10, 14].

Тестування та апробація діагностично-експертного комплексу на елементах дефектних труб. У лабораторних умовах здійснено комплекс тестових випробувань розробки, а також проведено роботи з виявлення реальних дефектів в тривало експлуатованих трубах газопроводів.

Зокрема, тестування діагностично-експертного комплексу здійснено на елементах труб із модельними (штучно створеними) дефектами (рис. 6, *а*). Ці зразки моделювали елемент труби із осьовим надрізом – концентратором напружень півеліптичної форми. При цьому тестувались зразки з модельними дефектами різної форми, тобто відношення півосей еліпса було різним: $c/a = 0{,}05\ldots0{,}3$, що відповідало різним типам реальних експлуатаційних пошкоджень трубопроводів (корозійна боріздка та корозійний пітинг). А також проведено випробування з виявлення реальних дефектів у тривало експлуатованих трубах газопроводів (рис. 6, *б*).

Запропонована розробка дозволяє безпосередньо на місці діагностики зробити науково обґрунтовані експертні висновки про ризик руйнування та безпечну експлуатацію дефектного елемента трубопроводу, тобто дати диференційовану оцінку розмірів допустимих дефектів залежно від стану матеріалу трубопроводу, характеру експлуатаційних навантажень та специфіки транспортованих продуктів.

Висновки

Розроблено діючий зразок портативного переносного діагностично-експертного комплексу, який включає засоби неруйнівного контролю (ультразвуковий дефектоскоп) та комп'ютерну експертну систему (на базі портативного комп'ютера) для оцінки ризику руйнування та прогнозування можливості подальшої експлуатації наземних ділянок тривало експлуатованих газопроводів з корозійними та тріщиноподібними дефектами. Основу комп'ютерної експертної програми складає спеціальна діаграма в координатах «критичні значення глибини тріщиноподібних дефектів – форма дефекту», яка базується на критеріях механіки руйнування матеріалів і містить три характерні зони, а саме: безпечної експлуатації; експлуатації з прогнозованим розвитком дефектів та зону ризику катастрофічного руйнування.

1. Корозійно-воднева деградація нафтових і газових трубопроводів та її запобігання: наук.-техн. посіб.: у 3 т. / Є. І. Крижанівський, Г. М. Никифорчин [за ред. В. В. Панасюка]. – Т. 2: Деградація нафтопроводів і резервуарів та її запобігання. – Івано-Франківськ: вид-во Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, 2011. – 447 с.
2. Корозійно-воднева деградація нафтових і газових трубопроводів та її запобігання: наук.-техн. посіб.: у 3 т. / Є. І. Крижанівський, Г. М. Никифорчин [за ред. В. В. Панасюка]. – Т. 3: Деградація газопроводів та її запобігання. – Івано-Франківськ: вид-во Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, 2012. – 433 с.
3. Механіка руйнування та міцність матеріалів: довідн. посіб.; за заг. ред. В. В. Панасюка. – Т. 11: Міцність і довговічність нафтогазових трубопроводів і резервуарів / Г. М. Никифорчин, С. Г. Поляков, В. А. Черватюк [та ін.]: [за ред. Г. М. Никифорчина]. – Львів: Сполом, 2009. – 504 с.
4. Механіка руйнування та міцність матеріалів: довідн. посіб. / За заг. ред. В. В. Панасюка. – Т. 13: Працездатність матеріалів і елементів конструкцій з гострокінцевими концентраторами напружень / І. М. Дмитрах, Л. Тот, О. Л. Білий [та ін.]: [за ред. В. В. Панасюка]. – Львів: Сполом, 2012. – 316 с.
5. Дефектоскоп ультразвуковой УД4-76. Руководство по эксплуатации УД4-76. 23535778.04.01.06РЭ. – К., 2010. – 113 с.
6. Механика разрушения и прочность материалов: справ. пособ.; под общ. ред. В. В. Панасюка. – Т. 2: Коэффициенты интенсивности напряжений в телах с трещинами / М. П. Саврук. – К.: Наукова думка, 1988. – 620 с.

7. Механика разрушения и прочность материалов: справ. пособ.; под общ. ред. В.В. Панасюка. – Т. 4: Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов / О. Н. Романив, С. Я. Ярема, Г. Н. Никифорчин [и др.]. – К.: Наукова думка, 1990. – 680 с.
8. Dmytrakh I. M. Corrosion fatigue cracking and failure risk assessment of pipelines / I.M. Dmytrakh // Safety, Reliability and Risks Associated with Water, Oil and Gas Pipelines: NATO Science for Pease and Security Series C: Environmental Security. – The Netherlands: Springer, 2008. – P. 99–113.
9. Дмитрах І. М. Вплив корозійних середовищ на локальне руйнування металів біля концентраторів напружень / І. М. Дмитрах, В.В. Панасюк. – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, 1999. – 342 с.
10. ВБН В.2.3-00018201.04-2000. Розрахунки на міцність діючих магістральних трубопроводів з дефектами. – К.: Держнафтогазпром України, 2000. – 57 с. – (Відомчі будівельні норми України).
11. Оцінка корозійного стану газопроводів за результатами внутрітрубної діагностики / А. Кичма, Р. Коваль, Ю. Банахевич [та ін.] // Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів (Корозія–2002): у 2 т. // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2002. – Спец. вип. № 3. – Т. 1. – С. 802–806.
12. Електрохімічний моніторинг магістральних трубопроводів на корозійно-небезпечних ділянках / С. Поляков, А. Клименко, Л. Ниркова [та ін.] // Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів (Корозія–2008): у 2 т. // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2008. – Спец. вип. № 7. – Т. 2. – С. 761–766.
13. Корозія внутрішньої поверхні магістральних газопроводів / С. Поляков, Л. Ниркова, А. Клименко [та ін.] // Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів (Корозія–2006): у 2 т. // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2006. – Спец. вип. № 5. – Т. 1. – С. 300–304.
14. Ориняк І. В. Наукові і організаційні засади впровадження ризик-аналізу в практику управління цілістю магістральних трубопроводів / І. В. Ориняк, М. В. Бородій, А. С. Батура // Цільова комплексна програма НАН України „Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин”: [зб. наук. статей за результатами, отриманими в 2004–2006 рр. / наук. кер. Б. Є. Патон]. – К.: Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, 2006. – С. 11–15.

An operating sample of portable diagnostic-expert complex was developed. The complex includes non-destructive testing means (ultrasonic flaw detector) and computer expert system for assessment of the risk of failure and prediction of the possibility of further operation of ground sections of gas pipelines with corrosion and cracklike defects in long-term operation. The base of the computer expert program is a special diagram in the coordinates of «critical values of cracklike defect depth – defect shape», which is plotted using the criteria of material fracture mechanics, allowing for the influence of aggressive working media. The proposed development allows making scientifically based conclusions about the risk of failure and safe service of a defective pipeline element directly in the site of diagnostics. 14 References, 6 Figures.

K e y w o r d s : ground sections of gas pipelines, corrosion and cracklike defects, ultrasonic flaw detection, computer expert system, critical dimensions of defects, diagram of assessment of defective pipeline performance

Надійшла до редакції
17.06.2016

СВАРКА И РЕЗКА-2017

17-я Международная специализированная выставка
«Оборудование, материалы, технологические процессы
для сварочного производства, приборы контроля»

04.04.2017–07.04.2017 ЗАО «МинскЭкспо», г. Минск, Беларусь

Тематика

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

Выставка проводится одновременно с международными специализированными выставками «Металлообработка» и «Порошковая металлургия».

Тел.: +375-17-226-98-58, 226-90-83
Факс: +375-17-226-98-58, 226-99-36

УДК 624.014.2:620.193:620.194

ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ ПІДХОДІВ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ ДЕГРАДАЦІЇ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ

О. І. ЗВІРКО
Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України. 79060, м. Львів-60, вул. Наукова, 5.
E-mail: pminasu@ipm.lviv.ua

Представлено можливості використання електрохімічних підходів для діагностування деградації конструкційних сталей відповідальних конструкцій, спричиненої їх тривалою експлуатацію. Побудована кореляційна залежність для, з одного боку, експлуатаційного зниження ударної в'язкості як характеристики опору крихкому руйнуванню, а з іншого – зміни поляризаційного опору, який можна вимірювати у польових умовах. Така залежність дає можливість на основі електрохімічних характеристик прогнозувати поточні механічні властивості сталей. Бібліогр. 21, табл. 5, рис. 4.

Ключові слова: сталь, тривала експлуатація, агресивне середовище, електрохімічні характеристики, прогнозування механічних властивостей

Тривала експлуатація часто призводить до зниження механічних властивостей конструкційних матеріалів, які закладалися в інженерні розрахунки на стадії проектування. Найнебезпечнішим з огляду забезпечення цілісності конструкцій вважається зниження характеристик опору крихкому руйнуванню [1–3], які до того ж найчутливіші до експлуатаційної деградації матеріалів. У випадку дії на них агресивних корозивно-наводнювальних середовищ ризик неконтрольованого руйнування збільшується, на що вказує різкий спад характеристик корозійно-механічного руйнування [1, 2, 4, 5]. Відповідно актуальне діагностування поточного рівня механічних і корозійно-механічних властивостей тривало експлуатованих матеріалів. Останнім часом підвищена увага до цієї проблеми, розвивається низка методів діагностування їх деградації, це, зокрема, акустичні, вихрострумові, магнітні та електричні, а також метод індентування [6–10].

Нещодавно саме для діагностування деградації механічних властивостей металічних матеріалів конструкцій тривалої експлуатації запропоновано використовувати електрохімічні (ЕХ) підходи [11–13]. ЕХ показники характеризують систему «метал–середовище», тому зміни хоч би в одному складнику системи повинні викликати певну реакцію і в ЕХ поведінці металу. Якщо тривала експлуатація зумовлює зміну стану металу, на що вказують оцінки його механічних властивостей, то також можна очікувати і відповідної трансформації його ЕХ характеристик. Цей аспект можна використовувати в методі неруйнівного контролю технічного стану металу реальних об'єктів. Раніше на прикладі сталей нафтогазового комплексу та енергетики, а також алюмінієвого сплаву авіабудування показано, що такі ЕХ показники, як поляризаційний опір і густина струму корозії, є достатньо чутливими до експлуатаційної деградації металу.

У роботі на прикладі ширшого кола об'єктів тривалої експлуатації подано подальший розвиток ЕХ підходів щодо прогнозування механічних властивостей конструкційних сталей.

Особливості застосування ЕХ методів для оцінювання експлуатаційної деградації металу за зміною його фізико-механічних властивостей. Основні наукові аспекти у застосуванні методу полягають в отриманні достатньої чутливості ЕХ відклику на експлуатаційну зміну стану металу та побудові кореляційної залежності між цим відкликом та механічною, корозійно-механічною чи іншою характеристикою, яка визначальна в забезпеченні роботоздатності конструкційного матеріалу. У приведеному аналізі це ударна в'язкість як найуживаніша та практично завжди регламентована характеристика опору крихкому руйнуванню і, відповідно, для неї отримано достатній масив даних. У ньому беруть до уваги експлуатаційне зниження ударної в'язкості, визначене відношенням її рівня KCV_{deg} для експлуатованого до величини KCV_{in} для вихідного матеріалу. Однак не менш важливе прогнозування і інших властивостей, таких як тріщиностійкість, втомна міцність, корозійно-механічна міцність, включаючи корозійну тріщиностійкість, тощо. Саме вони найчастіше використовуються для обґрунтування граничного навантаження, витривалості та ресурсу елементів конструкцій.

Інший, інженерно-технічний, аспект проблеми полягає у забезпеченні можливості ЕХ вимірю-

© О. І. Звірко, 2016

вань безпосередньо на об'єкті. Для цього потрібні не тільки портативні потенціостати, часто з автономним живленням, доступ до діагностованого металу, але і спеціальної конструкції ЕХ комірок [14], які треба кріпити до металевих поверхонь конструкцій, що можуть бути різної геометрії, похилими чи вертикальними.

Достатню чутливість методу забезпечують використанням корозивного середовища з депасиваційними властивостями. Для вуглецевих і низьколегованих сталей це можуть бути нейтральні хлоридні чи кислотні (для прикладу, з pH 2) розчини, коли на металі відсутні щільні захисні плівки. Це важливо враховувати, оскільки предметом оцінювання є саме стан металу, а поверхневі плівки можуть спотворювати ЕХ відклик.

Основу ЕХ аналізу складає поляризаційна крива в координатах «потенціал E–густина струму i». Він дає можливість визначати низку параметрів, практично придатних для діагностування, зокрема, стаціонарний потенціал E_{st}, густина струму корозії i_{corr} та поляризаційний опір R_p.

На рис. 1 на прикладі діагностування деградації вуглецевої сталі типу Ст3сп портального крану, який експлуатувався впродовж 40 років в режимі циклічного навантаження, продемонстровано відмінність у поляризаційних кривих *E–I* для вихідного та експлуатованого металу [14]. На їх основі визначили згадані показники E_{st}, i_{corr} та R_p (табл. 1), з яких тільки i_{corr} та R_p виявилися чутливими в оцінюванні експлуатаційної деградації металу, на що вказує відношення рівня ЕХ показника експлуатованого до цього показника неексплуатованого металу, відповідно $i_{corr\,deg}/i_{corr\,in}$ та $R_{p\,deg}/R_{p\,in}$. Заміна нейтрального розчину хлориду на кислий з pH 2 додаванням хлоридної кислоти підвищила цю чутливість.

Наші експерименти показали також зростання чутливості оцінювання експлуатаційної деградації вуглецевих сталей при підвищенні температури корозивного середовища [15]. Відомо, що температура впливає не тільки на швидкість електродних реакцій, розчинність кисню (деполяризатора), але і на властивості поверхневих плівок. Можливо, що тут проявляється саме останній чинник через послаблення бар'єрних властивостей плівок, що і слугує підвищенню чутливості ЕХ методу.

Зазначимо, що діагностування фізико-механічних властивостей сталей особливо важливе у випадку їх експлуатації в корозивно-наводнювальних середовищах, які прискорюють процес деградації через наводнювання металу. Однак це не означає, що саме робочі умови за складом середовища чи температури слід витримувати при ЕХ оцінках зміни стану металу. Робочі середовища певним чином впливають на деградацію металу, але при виборі електроліту для ЕХ діагностування її ступеня слід керуватися вище викладеним аналізом.

Окремо вирішується зазначена проблема стосовно неіржавних сталей, корозійна тривкість яких забезпечується високими захисними властивостями поверхневих плівок. На перший погляд ЕХ підхід для прогнозування експлуатаційної деградації механічних властивостей таких сталей непридатний, оскільки вона супроводжується підвищенням їх корозійної тривкості [3]. Однак якщо створити умови для корозії такого типу сталей в активному стані, а це можливо в розчині хлоридної кислоти [16], то отримуємо загальну для всіх сталей закономірність зниження упродовж експлуатації корозійної тривкості неіржавної сталі з відповідною зміною і ЕХ властивостей (рис. 2).

Розвиток ЕХ підходів стосовно діагностування сталей низки об'єктів тривалої експлуатації. На рис. 3, *а* приведена раніше побудована для експлуатованих газопровідних сталей кореляційна залежність «відносна зміна поляризаційного опору R_p – відносна зміна ударної в'язкості KCV» [13], для якої за вихідний вважали стан труб запасу. Дані отримані при ЕХ вимірюваннях у різних середовищах (модельне середовище водного кон-

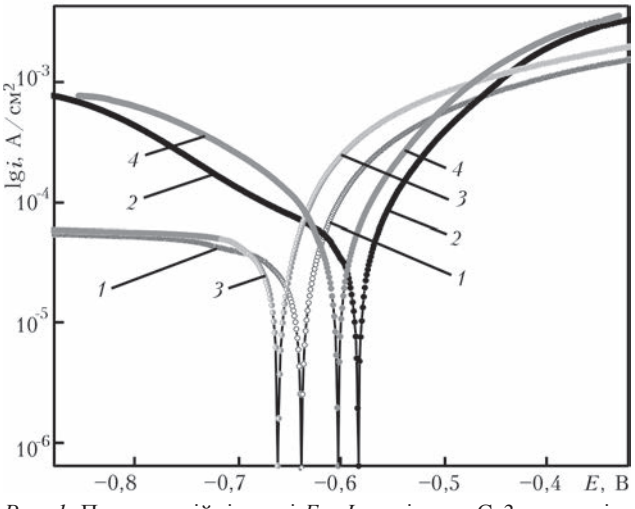


Рис. 1. Поляризаційні криві *E – I* сталі типу Ст3сп у вихідному (*1*, *2*) та експлуатованому (*3*, *4*) станах, побудовані для 0,3%-го розчину NaCl з pH 6,5 (*1*, *3*) та pH 2 (*2*, *4*)

Таблиця 1. Вплив тривалої експлуатації на ЕХ властивості у 0,3%-му розчині NaCl з pH 6,5 (перед косою) і pH 2 (після косої) та на ударну в'язкість сталі типу Ст3сп

Стан	E_{st}, В	i_{corr}, А/см²	R_p, Ом·см²	KCV, Дж/см²	$i_{corr\,deg}/i_{corr\,in}$	$R_{p\,deg}/R_{p\,in}$	KCV_{deg}/KCV_{in}
Вихідний	–0,64/–0,58	$1{,}48\cdot10^{-5}/1{,}90\cdot10^{-5}$	925/780	109	–	–	–
Експлуатований	–0,66/–0,60	$1{,}75\cdot10^{-5}/2{,}37\cdot10^{-5}$	780/625	80	1,18/1,25	0,84/0,80	0,73

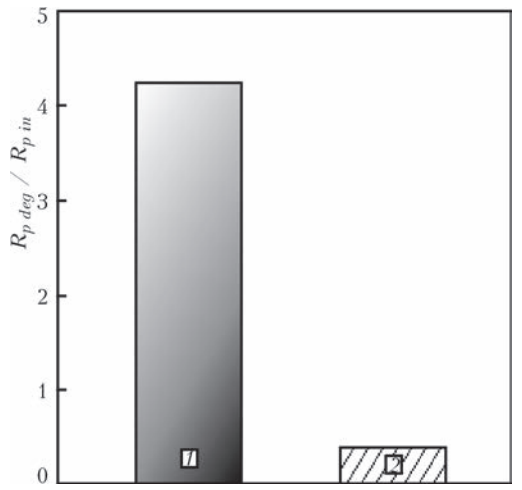


Рис. 2. Відношення $R_{p\,deg}/R_{p\,in}$ при корозії сталі 20Х13 у розчинах: 3 % NaCl (*1*) та 20 % HCl (*2*)

денсату та розчин NS-4), що й зумовило значний розкид даних, які, однак, описали прямою залежністю. Наведені дані нижче збагатили подібним аналізом і стосовно вуглецевих і низьколегованих сталей інших об'єктів тривалої експлуатації.

Сталь магістрального нафтопроводу. У цьому випадку слід порівнювати не тільки вихідний та експлуатований стани, але окремо виділяти «верх» та «низ» експлуатованої труби, оскільки можна очікувати інтенсивнішої деградації металу нижньої частини труби через деструктивну дію наводнювання внаслідок ЕХ взаємодії з металом залишкової (підтоварної) води [15].

У табл. 2 приведені результати ЕХ вимірювань з урахуванням такої специфіки, а також випробувань на ударну в'язкість. Зазначимо підвищення чутливості ЕХ методу при підвищенні температури корозивного середовища з 20 до 40 °С. Стосовно визначення *KCV* металу «низ» виникли проблеми через поворот на 90° площини руйнування під час ударного навантаження (зразки вирізали вздовж осі труби), що зумовлено експлуатаційним ослабленням адгезії між матрицею та витягнутими включеннями. Зразки повністю не руйнувалися (рис. 4), тому кількісно визначити опір крихкому руйнуванню не вдалося. Для металу «верх» цього не спостерігали, *KCV* експлуатованої сталі було вдвічі менше, ніж для вихідного стану. Однак, згідно ЕХ оцінок, експлуатація нафтопроводу призвела до сильнішої деградації сталі ділянки «низ».

Кутникова сталь гіперболоїдних сіткових веж. Так звані вежі Шухова будували на межі XIX і XX сторіч, відповідно, минуло більше 100 років від введення їх в експлуатацію. Досліджували властивості старовинних сталей водонапірної вежі у Черкасах та Аджигольського маяка, розташованого у гирлі р. Дніпро [18]. Такий метал порівняли із сучасною вуглецевою сталлю Ст.3. І хоч металур-

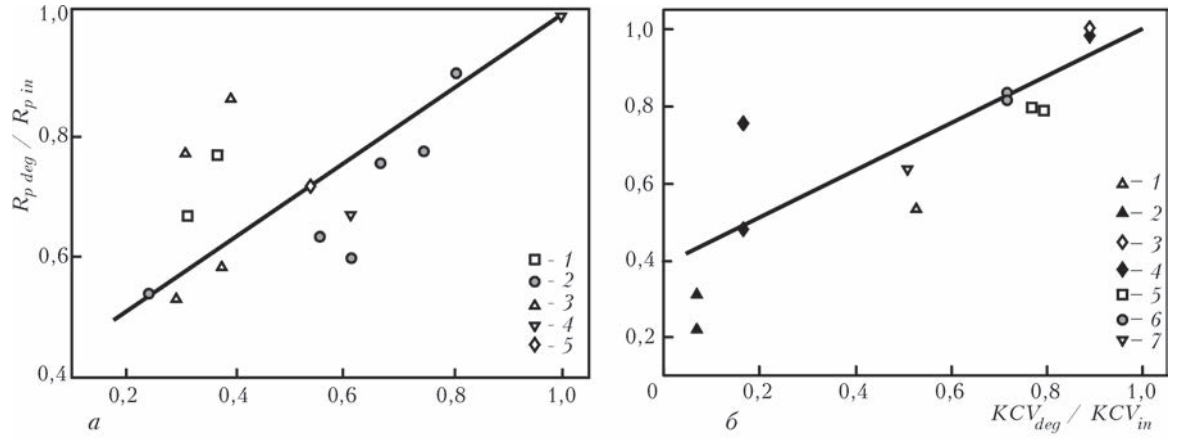


Рис. 3. Кореляція між відношеннями KCV_{deg} KCV_{in} та $R_{p\,deg}/R_{p\,in}$ для експлуатованих газопровідних сталей (*а*): низьковуглецевої (*1*), 17Г1С (*2*), Х52 (*3*), Х60 (*4*), Х70 (*5*) у модельному розчині водного конденсату (*1–3*) та розчині NS-4 (*4*, *5*) та для вуглецевих і низьколегованих сталей інших об'єктів тривалої експлуатації (*б*): 10ГС «верх» (*1*) та «низ» (*2*), Ст.3 вежі у Черкасах (*3*), маяка (*4*) та буртоукладника (*5*), Ст3сп портальних кранів (*6*) та 25Х1М1Ф роликів машин неперервного лиття заготовок (*7*) у модельній залишковій воді (*1*, *2*) та у 0,3 % (*3–5*) і 3% (*3*, *4*, *7*) розчинах NaCl

Таблиця 2. Вплив тривалої експлуатації на ЕХ властивості у модельній залишковій воді та ударну в'язкість сталі типу 10ГС магістрального нафтопроводу

Стан металу	T, °С	E_{st}, В	i_{corr}, А/см^2	R_p, Ом·см^2	KCV, Дж/см^2	$i_{corr\,deg}/i_{corr\,in}$	$R_{p\,deg}/R_{p\,in}$	KCV_{deg}/KCV_{in}
Вихідний	20	-0,51	$2{,}2\cdot10^{-5}$	1217	180	-	-	-
	40	-0,59	$2{,}5\cdot10^{-5}$	911		-	-	-
Експлуатований («низ»)	20	-0,58	$3{,}9\cdot10^{-5}$	382	12*	1,77	0,31	0,07*
	40	-0,60	$4{,}8\cdot10^{-5}$	201		1,92	0,22	
Експлуатований («верх»)	20	-0,56	$3{,}0\cdot10^{-5}$	644	95	1,36	0,53	0,53
* Приведені дані прогнозування з використанням ЕХ підходу								

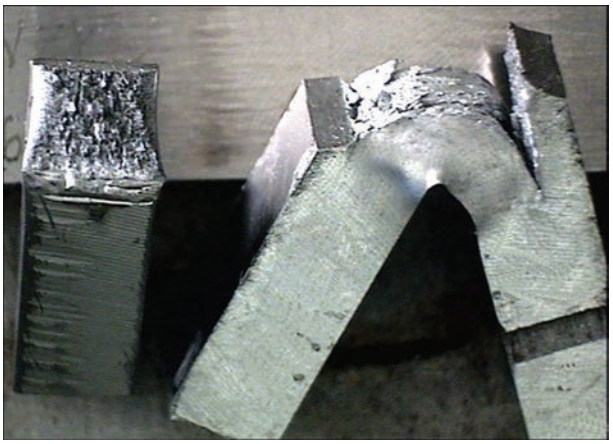


Рис. 4. Зразок, вирізаний з нижньої частини експлуатованого нафтопроводу, після випробувань на ударну в'язкість [17]

гійна якість сучасних і старовинних сталей принципово різна, порівняння за ЕХ ознаками лише останніх, однак експлуатованих за різних умов (табл. 3), дає можливість вважати виявлені значні відмінності результатом, в першу чергу, саме різного ступеня експлуатаційної деградації.

Не виявлено відмінностей в ЕХ показниках для вежі в Черкасах та сучасної сталі, що узгоджується з приблизно однаковим рівнем ударної в'язкості. Однак сталь маяка вирізняється у п'ять разів нижчим *KCV*, чому відповідають істотні відмінності і в ЕХ поведінці цього металу. Навіть потенціал E_{st}, який загалом малочутливий до деградації металу, в цьому випадку на 0,145 В негативніший. Не відкидаючи можливості значного розкиду даних для старовинних сталей одного класу, такі разючі відмінності у властивостях сталей сіткових веж слід пояснювати саме з позицій експлуатаційної деградації металу. Її висока інтенсивність у випадку сталі маяка зумовлена, очевидно, тривалим контактуванням з високоагресивним середовищем (морське повітря) з високою вологістю та вмістом солей, у тому числі хлоридів. Зазначимо, що за умов атмосферної корозії можливе наводнювання металу [19] і тоді зміна стану сталей проходить вже за сумісної дії експлуатаційних напружень і водню.

Кутникова сталь підіймально-транспортних механізмів. Такі конструкції експлуатуються в режимі сумісної дії циклічного навантаження та атмосферного середовища, яке, як зазначалося, можна розглядати і як наводнювальне [19]. Проаналізовано важливість діагностування поточних механічних властивостей сталей портальних кранів [14] і буртоукладника [20] та обґрунтована можливість використання для цього ЕХ підходів.

Окремі ділянки таких механізмів можуть експлуатуватися і у режимі циклічного навантаження стиском. Як виявилося [20], такі напруження зумовлюють втрату механічних властивостей сталі Ст.3 рами стріли буртоукладника практично в такій же мірі, як і розтягувальні (табл. 4, *KCV* нижче на ~ 20 %). ЕХ властивості, визначені за показниками i_{corr} та R_p, змінилися на ~ 25 % і для ділянки стиску, що корелює зі спадом механічних властивостей, зумовленим експлуатаційною деградацією металу.

Сталь роликів машин неперервного лиття металургійних заготовок. Вони експлуатуються за циклічної зміни температури поверхневих шарів, спричиненої періодичним контактом зі слябом та примусовим повітряно-водяним охолодженням крізь внутрішній отвір. У праці [21] досліджували механічні властивості сталі 25Х1М1Ф двох протилежних ділянок виведеного з експлуатації ролика (діаметром 320 мм): зовнішнього приповерхневого шару з інтенсивним термоциклуванням (експлуатаційна температура t = 375…600 °С) та внутрішнього, з зони охолодження (t = 40…60 °С). Метал останньої ділянки умовно вважали вихідним, тобто, що експлуатація ролика не вплинула на його властивості. У табл. 5 приведені дані ударної в'язкості [21], а також ЕХ властивостей металу цих ділянок.

Порівняння властивостей сталі різних ділянок ролика підтвердило загальну закономірність нижчої корозійної тривкості того металу, якому вла-

Таблиця 3. ЕХ параметри у 0,3-му % (перед косою) та 3-му % (після косої) водних розчинах NaCl та ударна в'язкість сталей сіткових веж

Сталь	E_{st}, В	i_{corr}, А/см^2	R_p, Ом·см^2	*KCV*, Дж/см^2	$i_{corr\,deg}/i_{corr\,in}$	$R_{p\,deg}/R_{p\,in}$	KCV_{deg}/KCV_{in}
Сучасна Ст.3	–0,525/–0,535	$1{,}27\cdot10^{-5}/0{,}84\cdot10^{-5}$	1156/1283	159	–	–	–
Вежа в Черкасах	–0,540/–0,535	$1{,}20\cdot10^{-5}/0{,}66\cdot10^{-5}$	1149/1202	141	0,95/0,78	0,99/0,94	0,89
Маяк	–0,670/–0,675	$1{,}56\cdot10^{-5}/1{,}40\cdot10^{-5}$	884/489	27	1,23/1,67	0,76/0,38	0,17

Таблиця 4. Вплив тривалої експлуатації на ЕХ властивості у 0,3%-му розчині NaCl та ударну в'язкість Ст3 буртоукладника

Стан		E_{st}, В	i_{corr}, А/см^2	R_p, Ом·см^2	*KCV*, Дж/см^2	$i_{corr\,deg}/i_{corr\,in}$	$R_{p\,deg}/R_{p\,in}$	KCV_{deg}/KCV_{in}
Вихідний		–0,524	$7{,}86\cdot10^{-6}$	2074	159	–	–	–
Експлуатований	розтяг	–0,533	$9{,}82\cdot10^{-6}$	1660	123	1,25	0,80	0,77
	стиск	–0,548	$9{,}89\cdot10^{-6}$	1648	127	1,26	0,79	0,80

Таблиця 5. Вплив тривалої експлуатації на ЕХ властивості у 3%-му розчині NaCl та ударну в'язкість сталі 25Х1М1Ф ролика

Стан	E_{st}, В	i_{corr}, А/см^2	R_p, Ом·см^2	KCV, Дж/см^2	$i_{corr\,deg}/i_{corr\,in}$	$R_{p\,deg}/R_{p\,in}$	KCV_{deg}/KCV_{in}
Вихідний	–0,583	$9{,}13\cdot10^{-6}$	1786	125	–	–	–
Експлуатований	–0,612	$12{,}50\cdot10^{-6}$	1118	64	1,37	0,63	0,51

стивий менший опір крихкому руйнуванню.

Побудова універсальної кореляційної залежності для діагностування експлуатаційної деградації вуглецевих і низьколегованих сталей. Отримані дані, з одного боку, зміни ударної в'язкості, а з іншого – поляризаційного опору, наклали на залежність «відносна зміна R_p – відносна зміна KCV» стосовно газопровідних сталей (див. рис. 3, *а*) і виявили узгодження з попередніми результатами (рис. 3, *б*). Це означає загалом універсальність такої залежності для даного типу сталей незалежно від об'єкту діагностування та експлуатаційних умов. Вони впливають на ступінь деградації механічних властивостей, але цьому відповідає певний ступінь зміни ЕХ характеристик. Це полегшує набір бази даних у цьому напрямі, оскільки можна використовувати широке коло об'єктів, обмеження стосуються тільки типу сталей. А розкид даних можна зменшити, якщо їх селекціонувати за складом середовищ для ЕХ вимірювань та їх температурою. Яскравий цьому приклад: відношення $R_{p\,deg}/R_{p\,in}$, яке характеризує ЕХ відклик (за поляризаційним опором) на експлуатаційну зміну стану металу, змінилося для сталі Аджигольського маяка від 0,76 до 0,48 при підвищенні концентрації NaCl у водному розчині від 0,3 до 3 % (див. табл. 3). Стосовно неіржавних сталей питання відкрите, необхідний набір ЕХ даних при їх корозії в активному стані. Перспективна також побудова подібної залежності і для інших механічних чи корозійно-механічних характеристик, прогнозування яких може вважатися важливішим за ударну в'язкість при інженерних розрахунках міцності та довговічності, у тому числі залишкового ресурсу.

Зазначимо, що в кореляційній залежності приведені не величини R_p і KCV, а їх зміни впродовж експлуатації. Тому для практичного використання цієї залежності для діагностування поточного стану механічних властивостей необхідні дані про механічний стан металу до експлуатації та його ЕХ характеристики до і після експлуатації. За наявності металу у вихідному стані (наприклад, труба запасу) проблема формально усувається, хоч необхідно враховувати розкид даних і в цьому випадку. За відсутності такого металу слід вишукувати в конструкції ділянки з мінімальним рівнем експлуатаційних напружень, як це було зроблено у випадку діагностування сталі стріли буртоукладника [20], і умовно, для порівняння, вважати такий метал вихідним.

Розвинутий ЕХ підхід може бути корисним і для прогнозування механічних чи інших властивостей, які важко оцінити традиційно в лабораторних умовах. Для прикладу, ударну в'язкість проблематично визначати на тонколистових матеріалах. У нашому випадку неможливо було встановити рівень KCV для сталі нафтопроводу через переорієнтацію під час випробувань площини руйнування на 90° (див. рис. 4). Однак, використовуючи залежність $KCV_{deg}/KCV_{in} - R_{p\,deg}/R_{p\,in}$, вдалося спрогнозувати рівень KCV, який склав ~ 12 Дж/см^2 (див. табл. 2). Це надзвичайно низький рівень ударної в'язкості, співмірний з KCV сталей з мартенситною структурою та чавуном і вказує на високий ступінь деградації металу, яка й зумовила схильність металу до макророзшарування.

Висновки

Розвинуто електрохімічний підхід для прогнозування поточних механічних властивостей тривало експлуатованих конструкційних сталей. Важливим є вибір корозивного середовища для ЕХ вимірювань, яке повинно характеризуватися депасувальними властивостями, що можна досягти використанням хлоридів, підвищенням кислотності електроліту та температури випробувань. На прикладі експлуатованих сталей низки відповідальних об'єктів встановлено, що кореляційна залежність $KCV_{deg}/KCV_{in} - R_{p\,deg}/R_{p\,in}$, яка є основою для прогнозування рівня KCV_{deg}, є універсальною і незалежною від об'єкту та умов експлуатації, однак може залежати від типу сталі та умов ЕХ вимірювань. Проаналізований ЕХ підхід може бути корисним і для прогнозування ударної в'язкості експлуатованого металу у випадку неможливості його визначення традиційним шляхом.

1. Nykyforchyn H. M. Hydrogen degradation of steels in long term service conditions / H. M. Nykyforchyn, K.-J. Kurzydlowski, E. Lunarska // Environment-induced cracking of materials. Vol. 2: Prediction, industrial developments and evaluations / ed. by S. Shipilov. – Elsevier, 2008. – P. 349–361.
2. Красовский А. Я. Стресс-коррозионные разрушения магистральных трубопроводов / А. Я. Красовский, И. В. Лохман, И. В. Орыняк // Проблемы прочности. – 2012. – № 2. – С. 23–43.
3. Деградація сталей в агресивних середовищах, залишковий ресурс обладнання і корозійний моніторинг / О. Г. Архипов, В. А. Борисенко, М. С. Хома [та ін.]. – Луганськ: Вид-во Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, 2016. – 203 с.

4. Крижанівський Є. І. Оцінювання роботоздатності нафтогазопроводів тривалої експлуатації за параметрами їх дефектності / Є. І. Крижанівський, Р. С. Грабовський, О. М. Мандрик // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2013. – **49**, № 1. – С. 105–110.
5. Environmentally assisted «in-bulk» steel degradation of long term service gas trunkline / H. Nykyforchyn, E. Lunarska, O. Tsyrulnyk [et al.] // Eng. Failure Analysis. – 2010. – **17**. – P. 624–632.
6. Назарчук З. Т. Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій: Наук.-техн. пос.: у 3 т. – Т. 2.: Методологія акустико-емісійного діагностування / З. Т. Назарчук, В. Р. Скальський. – К.: Наукова думка, 2009. – 263 с.
7. Безлюдько Г. Я. Серия портативных приборов-структуроскопов, основанных на измерении величины коэрцитивной силы / Г. Я. Безлюдько, В. Ф. Мужицкий, В. Б. Ремезов // Контроль. Диагностика. – 2003. – № 6. – С. 7–10.
8. Криничний П. Я. Прилад для контролю фізико-механічних характеристик труб нафтового сортаменту СІГМА-5Т / П. Я. Криничний, І. А. Молодецький // Методи та прилади контролю якості. – 1998. – № 2. – С. 9–10.
9. Застосування комплексного підходу до визначення фізико-механічних характеристик нафтогазового обладнання / М. О. Карпаш, І. С. Кісіль, О. М. Карпаш [та ін.] // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2006. – № 2. – С. 13–18.
10. Оцінювання експлуатаційної деградації сталі газопроводу руйнівними і неруйнівними методами / Ю. В. Мільман, Г. М. Никифорчин, К. Е. Грінкевич [та ін.] // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2011. – **47**, № 5. – С. 13–18.
11. Електрохімічні показники експлуатаційної деградації сталей нафто- і газогонів / О. Цирульник, Г. Никифорчин, З. Слободян [та ін.] // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2006. – Спецвип. № 5, т. 1. – С. 284–289.
12. Цирульник О. Т. Оцінка деградації властивостей як характеристика технічного стану матеріалів конструкцій тривалої експлуатації / О. Т. Цирульник // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2009. – № 2. – С. 36–41.
13. Цирульник О. Т. Використання методів електрохімії в діагностуванні технічного стану конструкційних матеріалів / О. Т. Цирульник // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2013. – 49, № 4. – С. 29–39.
14. Пустовой В. Електрохімічний метод контролю експлуатаційної деградації механічних властивостей сталей морських портальних кранів / В. Пустовой, І. Рещенко, О. Звірко // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – Тернопіль: ТНТУ, 2015. – Т. 77. – № 1. – С. 79–87.
15. Слободян З. В. Корозійна тривкість трубної сталі у нафтоводних середовищах / З. В. Слободян, Г. М. Никифорчин, О. І. Петрущак // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2002. – № 3. – С. 93–96.
16. Похмурський В. І. Корозійна втома металів і сплавів // В. І. Похмурський, М. С. Хома. – Львів: СПОЛОМ, 2008. – 304 с.
17. Окрихчення сталі магістрального нафтопроводу / О. Т. Цирульник, Г. М Никифорчин, О. І. Звірко [та ін.] // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2004. – № 2. – С. 125–126.
18. Структура і властивості тривало експлуатованих сталей гіперболоїдних сіткових веж Шухова / Г. М. Никифорчин, А. О. Кутний, О. З. Студент [та ін.] // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2013. – 49, № 6. – С. 70–78.
19. Hydrogen entry into steel during atmospheric corrosion process / T. Tsuru, Ya. Huang, Md. R. Ali [et al.] // Corr. Sci. – 2005. – **47**, № 10. – P. 2431–2440.
20. Харченко Є. В. Оцінювання експлуатаційної деградації профільної сталі стріли буртоукладника / Є. В. Харченко, Л. К. Поліщук, О. І. Звірко // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2013. – **49**, № 4. – С. 77–82.
21. Ясній П. В. Ролики МБЛЗ: деградація і тріщиностійкість матеріалів / П. В. Ясній, П. О. Марущак. – Тернопіль: Джура, 2009. – 231 с.

The paper present the possibilities of application of electrochemical methods for diagnostics of degradation of structural steels in critical structures, caused by their long-term operation. A correlation dependence was plotted, on the one hand, for operational lowering of impact toughness as a characteristics of brittle fracture resistance, and on the other hand for a change of polarization resistance which can be measured in the field conditions. Such dependence enables prediction of current mechanical properties of steels by the method of non-destructive monitoring of electrochemical characteristic. 21 Reference, 5 Tables, 4 Figures.

Keywords: steel, long-term service, aggressive environment, electrochemical characteristics, prediction of mechanical properties

Надійшла до редакції
07.09.2016

Российское Общество по неразрушающему контролю и технической диагностике

РОНКТД

XXI ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ

1-3 МАРТА 2017 ГОДА
МОСКВА, ЦВК ЭКСПОЦЕНТР

Научные направления конференции

Магнитные методы НК
Электромагнитные методы НК
Акустические методы НК
Радиационные методы НК
Оптические, тепловые, микроволновые методы НК
Течеискание, капиллярные, комбинированные методы НК
Методы НК остаточного ресурса
Вибродиагностика
Акустическая эмиссия
Антитеррористическая диагностика
Обучение, сертификация
Промышленная безопасность
Техническая диагностика
Сертификация

Полную информацию о программе конференции, требованиям к докладам и стоимости участия на сайте www.conf.ronktd.ru

УДК 528-024

ІНЖЕНЕРНИЙ ГЕОДЕЗИЧНИЙ МОНІТОРИНГ ФУНДАМЕНТІВ ОБЛАДНАННЯ КОМПРЕСОРНИХ СТАНЦІЙ

В. Т. КРИВОРУЧКО[1], М. І. НАВАЛЬНЄВ[2]

[1]Харків. нац. ун-т будівництва та архітектури. 61002, м. Харків, вул. Сумська, 40. E-mail: limbik@narod.ru

[2]Харків. територіальний центр філії НВЦ «ТЕХДІАГАЗ». 61002, м. Харків, вул. Маршала Конєва, 16. E-mail:shkorina-enbung.ua

Розглянуто основні проблеми організації геодезичного моніторингу компресорних станцій магістрального газопроводу. На сучасному етапі об'єднання роботизованих технологій лінійно-кутових вимірів і сучасних автоматичних систем спостережень за осіданнями фундаментів обладнання дозволяє створити автоматичну систему геодезичного моніторингу устаткування газотранспортних систем. Бібліогр. 4, рис. 14.

Ключові слова: геодезичний моніторинг споруджень, українська газотранспортна система, осідання фундаментів

Україна є найбільшою транзитною державою по транспортуванню газу до Західної Європи. Її газотранспортна система здатна щорічно перекачувати до 300 млрд м^3 природного газу. Вага України в транспортуванні газу в Європі становить приблизно 20 %. Щоб передати газ із місця видобутку до споживача необхідні: трубопроводи, компресорні станції (КС), пункти обліку газу, газові сховища, газорозподільні станції та ін.

При експлуатації КС внаслідок зносу підшипників газотурбінних двигунів і відцентрових нагнітачів газоперекачувальних агрегатів (ГПА) [1], контактних напружень на фундаменти ГПА та опори трубопроводів [2], змін гідрогеологічних умов та інших факторів, що впливають на несучу здатність ґрунтів [3], виникають вертикальні й горизонтальні деформації фундаментів обладнання КС. Ці деформації мають локальний і глобальний характер. Вплив різних деформацій на працездатність устаткування компресорних станцій показані на рис. 1.

Найнебезпечнішими є локальні відносні осідання фундаментів агрегатів. Вигин Δh фундаментної плити призведе до утворення ексцентриситу Δe осей ГПА. Наприклад, при наявності ексцентриситету навіть Δe = 0,5 мм, і коли відносне осідання фундаменту більше допустимої величини (2,5 мм), то виникають високі рівні вібрації, що можуть привести до руйнування анкерних болтів. Окремі агрегати компресорної станції

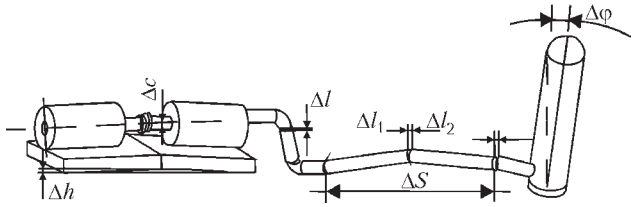


Рис. 1. Вплив деформацій ґрунту на працездатність агрегатів

з'єднані між собою трубопроводами. Будь-які зміни просторового положення агрегатів викличуть зростання напружень в місцях сполучень агрегатів і трубопроводів. Небезпечні для трубопроводів деформації, що впливають на їхню працездатність, становлять приблизно 5…10 см. Крен 10′ приведе до вертикальних деформацій труб у межах 1 см. Величини допустимих напружень у трубах визначаються згідно СНіП 2.05. 06–85. Горизонтальні зсуви ґрунту ΔS приводять до прогинів труб, також викликаючи напруження в трубах. Особливо небезпечні зсувні ділянки.

Для забезпечення нормальної експлуатації устаткування компресорних станцій необхідно систематично виконувати інженерний моніторинг контролю геометричних параметрів устаткування й території компресорних станцій.

Ціна ліквідації аварії на трасах газопроводів дуже висока. Продуктивність лінійних КС становить від 5 до 100 млн м^3 газу на добу. Прийнявши середню продуктивність компресорної станції рівною 50 млн м^3 газу на добу при ціні газу \$ 200 за 1000 м^3 одержимо добовий збиток за рахунок припинення подачі газу: \$ 10 млн (більше 200 млн грн). Таким чином, ціна безаварійної експлуатації обладнання КС магістральних газопроводів становить орієнтовно 200 млн грн за добу.

Зараз на всіх об'єктах газотранспортної системи України здійснюється інженерно-геодезичний моніторинг основних об'єктів системи. Однак ці роботи не мають єдиної програми і напередодні майбутніх робіт з реконструкції вітчизняних КС необхідно виконати комплекс робіт з розробки нового проекту геодезичного моніторингу обладнання газотранспортної системи України на основі сучасних технологій.

Розглянемо основні положення цієї програми. Насамперед, визначимося зі складом робіт:

© В. Т. Криворучко, М. І. Навальнєв, 2016

– спостереження за осіданням контрольних марок, установлених на технологічному обладнанні й основних спорудженнях об'єктів системи;

– спостереження за зсувними ділянками;

– контроль крену споруджень баштового типу;

– інструментальний і візуальний контроль стану технологічних і магістральних трубопроводів;

– контроль напруженого стану фундаментів устаткування;

– візуальний огляд устаткування й трубопроводів.

Для рішення цих завдань геодезична практика має у своєму розпорядженні високотехнологічне устаткування, що дозволяє з достатньою точністю в автоматичному й напівавтоматичному режимах виконувати ці роботи.

Перша група приладів – роботизовані тахеометри (рис. 2), що дозволяють визначати з високою точністю координати контрольних точок в автоматичному й напівавтоматичному режимах і передати отриману інформацію в єдиний центр обробки.

Цифрові нівеліри (рис. 3), що забезпечують високоточні висотні виміри, застосовуються при спостереженнях за осіданням.

Комплексне використання розглянутих приладів дозволяють сформувати напівавтоматичні вимірювальні системи з автоматичною обробкою результатів.

Рис. 2. Роботизований електронний тахеометр

Рис. 3. Цифровий нівелір

Друга група приладів – це повністю автоматичні системи, що забезпечують безперервний автоматичний контроль устаткування без участі операторів. До таких приладів віднесемо

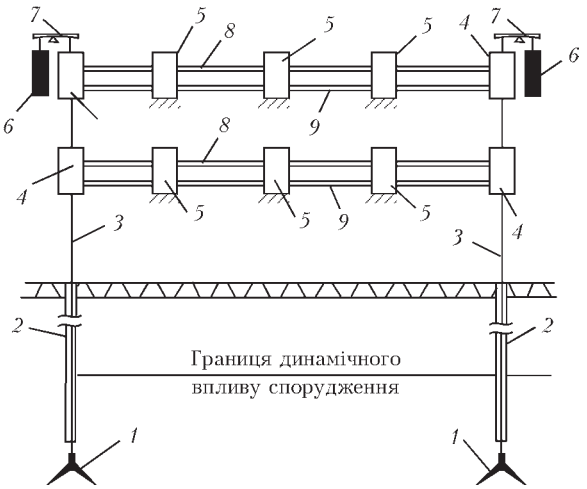


Рис. 4. Гідростатична система нівелювання: *1* – якір; *2* – обсадні труби; *3* – струни; *4* – опорні датчики; *5* – контрольні датчики; *6* – вантажі; *7* – коромисла; *8* – рідинні трубопроводи; *9* – повітряні трубопроводи

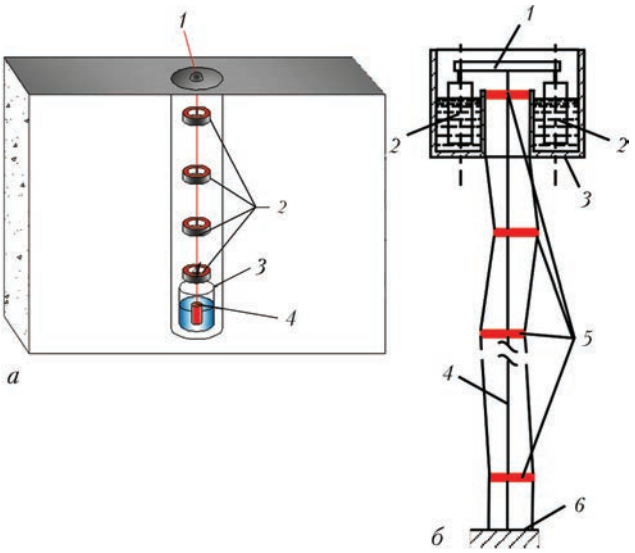


Рис. 5. Прямий (*а*) і зворотний (*б*) виски (*а*: *1* – підвіс виска; *2* – датчики положення струни; *3* – посудина з рідиною *4* – висок; *б*: *1* – хрестовина; *2* – поплавець; *3* – посудина з рідиною; *4* – нитка схилу; *5* – датчики положення нитки схилу; *6* – якір)

Рис. 6. Безпілотний літальний апарат

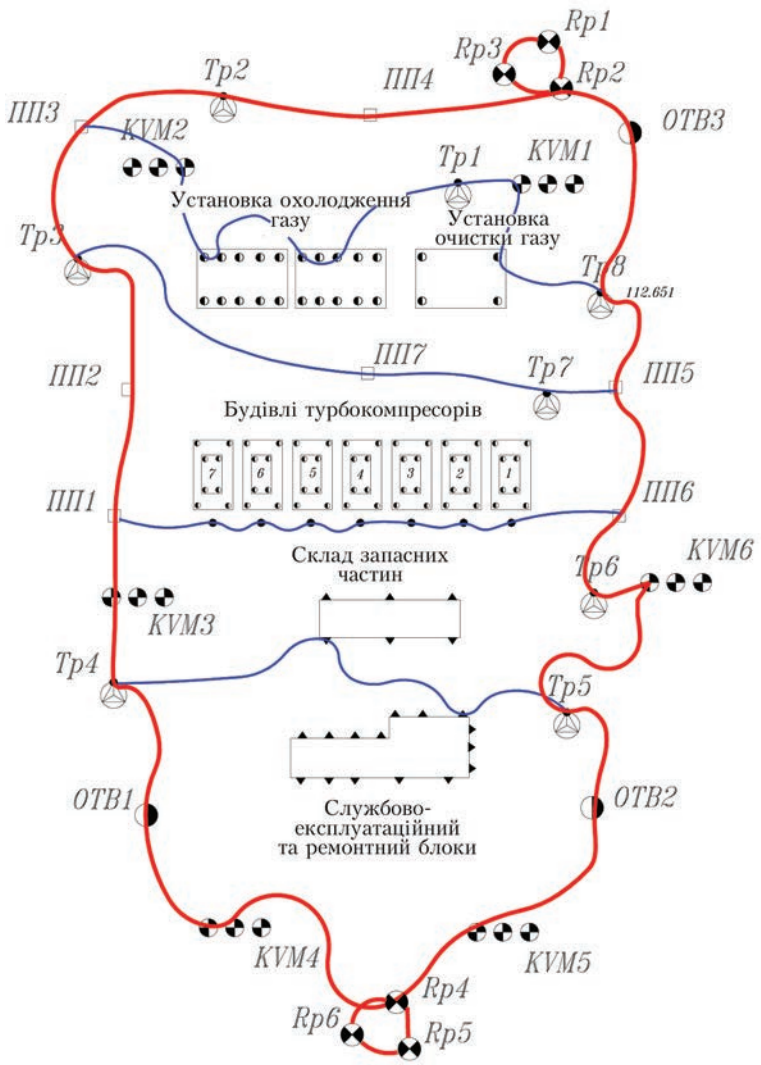


Рис. 7. Схема нівелірної мережі нівелювання першого етапу: *Rp1–Rp6* – опорні репери; *OTV1–OTV3* – зворотні виски; *ПП1–ПП7* – пункт полігонометрії; *KVM1– KVM6* – кущі глибинних марок; *TP1–TP8* – поверхневі марки на щоглах

автоматичні гідростатичні системи нівелювання, прямі й зворотні виски з дистанційним визначенням положення струни. Особливість цих систем полягає в тому, що вони працюють повністю автоматично з видачею інформації безпосередньо на пульт керування компресорних станцій.

Гідростатичні системи нівелювання [4] (рис. 4) складаються з контрольних і опорних датчиків, підвішених на спеціальних струнах опорних реперів. Дана система дозволяє здійснювати виміри на різних об'єктах незалежно від призначення й розмірів. Вона може мати кілька вимірювальних горизонтів. Але головною її особливістю є те, що вона має твердий зв'язок з опорною мережею, що представляє собою глибинні струнні репери, якорі яких розміщені поза зоною впливу споруджень.

Застосування датчиків визначення положення струни в прямих і зворотних висках (рис. 5) дозволило створити прилади дистанційного визначення пошарових горизонтальних зсувів контрольованих об'єктів. В умовах компресорних станцій зворотні виски використовуються як високоточні опорні планові знаки й прилади контролю зсувів ґрунту на зсувних ділянках.

В останні роки завдяки створенню мініатюрного навігаційного устаткування стало можливим застосування для геодезичних цілей безпілотних літальних апаратів (рис. 6). Їхня перевага в порівнянні з пілотованими апаратами очевидна. Вартість однієї години польоту літака або вертольота досягає кілька тисяч гривень. Для магістральних газопроводів найбільш прийнятні безпілотні літаки й дирижаблі. Дальність їхнього польоту досягає 100 км, а швидкість літаків може перевищувати 100 км/год.

За допомогою безпілотників здійснюється інспекційна топографічна зйомка або візуальний контроль устаткування.

На основі розглянутих сучасних засобів вимірів розроблені пропозиції по організації геодезичного інженерного моніторингу елементів газотранспортних систем.

Вимірювальний комплекс геодезичного моніторингу компресорних станцій як одного з основних елементів газотранспортної системи повинен складатися із двох підсистем: підсистеми контролю величин вертикальних зсувів об'єктів спостережень і підсистеми контролю горизонтальних зсувів споруджень і ґрунту.

Основним способом спостережень за осіданням є високоточне геометричне нівелювання, що

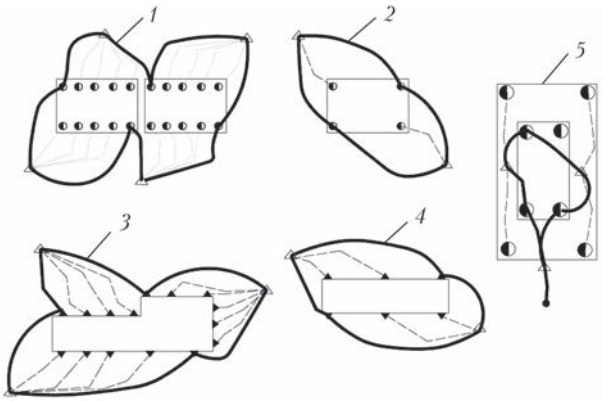


Рис. 8. Схема нівелювання окремих агрегатів: *1* – установка охолодження газу; *2* – установка очистки газу; *3* – службово-експлуатаційний і ремонтний блоки; *4* – склад запасних частин; *5* – турбоагрегати

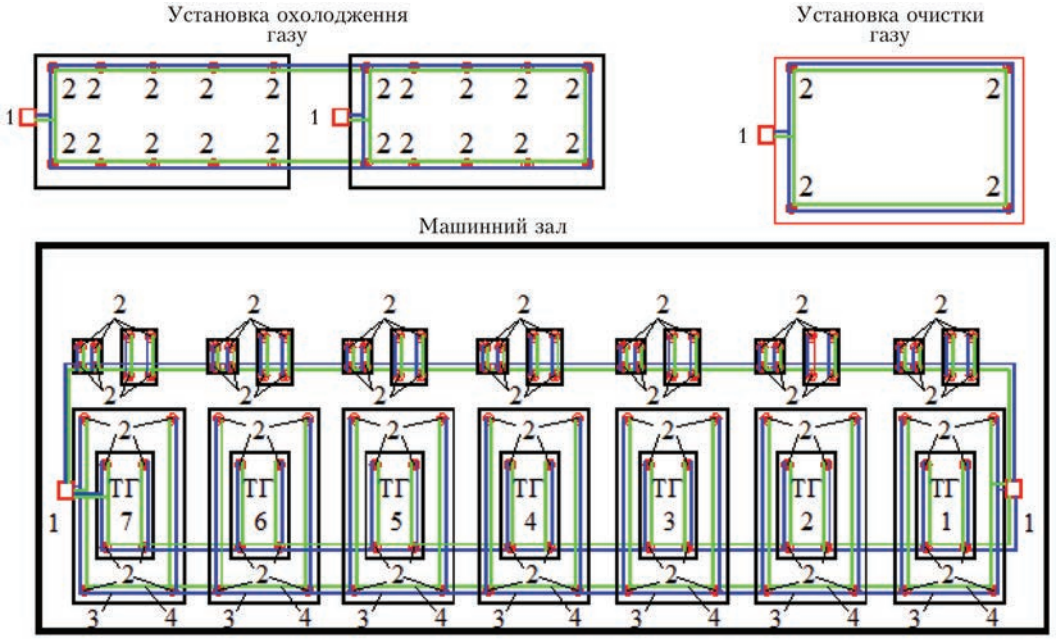


Рис. 9. Розміщення системи гідростатичного нівелювання: *1* – опорні датчики; *2* – контрольні датчики; *3* – рідинні трубопроводи; *4* – повітряні трубопроводи; *ТГ1–ТГ7* – газові турбіни

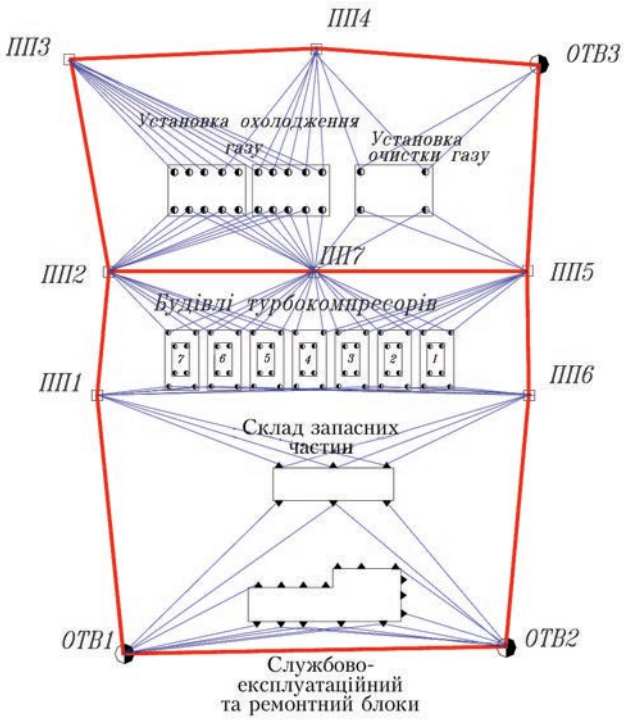


Рис. 10. Схема вимірів горизонтальних зсувів (умовні позначки ті самі, що і на рис. 7)

опирається на спеціальні кущі опорних реперів. Нівелювання виконується у два етапи. На першому етапі від опорних реперів визначаються позначки сполучних контрольних точок. Перший етап забезпечує одержання абсолютних значень величин осідань (точність порядку 2 мм). Схема нівелірної мережі для компресорних станцій відкритого типу наведена на рис. 7.

Відносні величини вертикальних переміщень, наприклад, величини вигину фундаментів агрегатів (див. рис. 1) визначаються за результатами нівелювання, прокладеного по периметрах окремих споруджень від сполучних точок. Цей вид нівелювання назвемо нівелюванням другого етапу. Точність такого нівелювання становить 0,2 мм. На рис. 8 наведено схеми нівелірних мереж другого етапу.

Спостереження за осіданням контрольованих об'єктів повинне виконуватися на протязі усього строку експлуатації компресорної станції. Для підвищення оперативності й надійності вимірів ці роботи найкраще виконувати спеціальними автоматичними гідростатичними системами нівелювання. Один з варіантів розміщення такої системи наведений на рис. 9.

Горизонтальні зсуви об'єктів пропонується визначати методом прямої лінійної кутової зарубки роботизованим тахеометром. Як обґрунтування застосовується полігонометрична мережа, що опирається на зворотні виски (рис. 10).

Розрахунок точності такої мережі показав, що точність визначення координат пунктів не перевищила 2 мм. Виміри повинні виконуватися в автоматичному режимі із включеною системою автонаведення, роль оператора зведеться тільки до установки, включенню й орієнтуванню приладу. Результати вимірів по каналу зв'язку передаються в єдиний центр обробки інформації. На етапі експлуатації компресорних станцій виміри в кожному циклі виконуються по єдиній програмі, що забезпечує виключення систематичних похибок і повну автоматизацію обробки. Тахеометри встановлюються на стаціонарні знаки або безпосередньо на зворотні виски. На рис. 11 показаний загальний вид пунктів полігонометрії й зворотних висків із установленими тахеометрами.

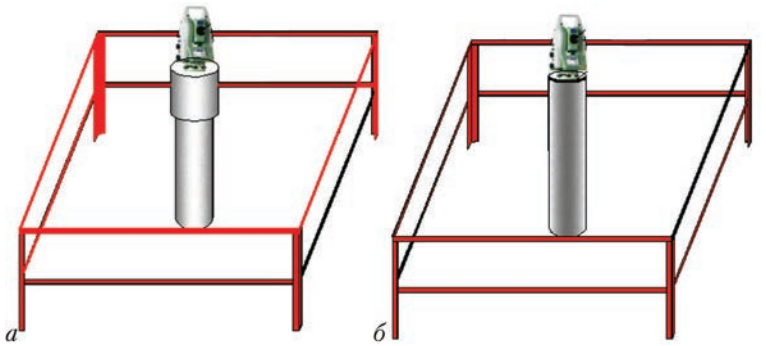


Рис. 11. Установка тахеометра: на зворотній висок (*а*) і на пункт полігонометрії (*б*)

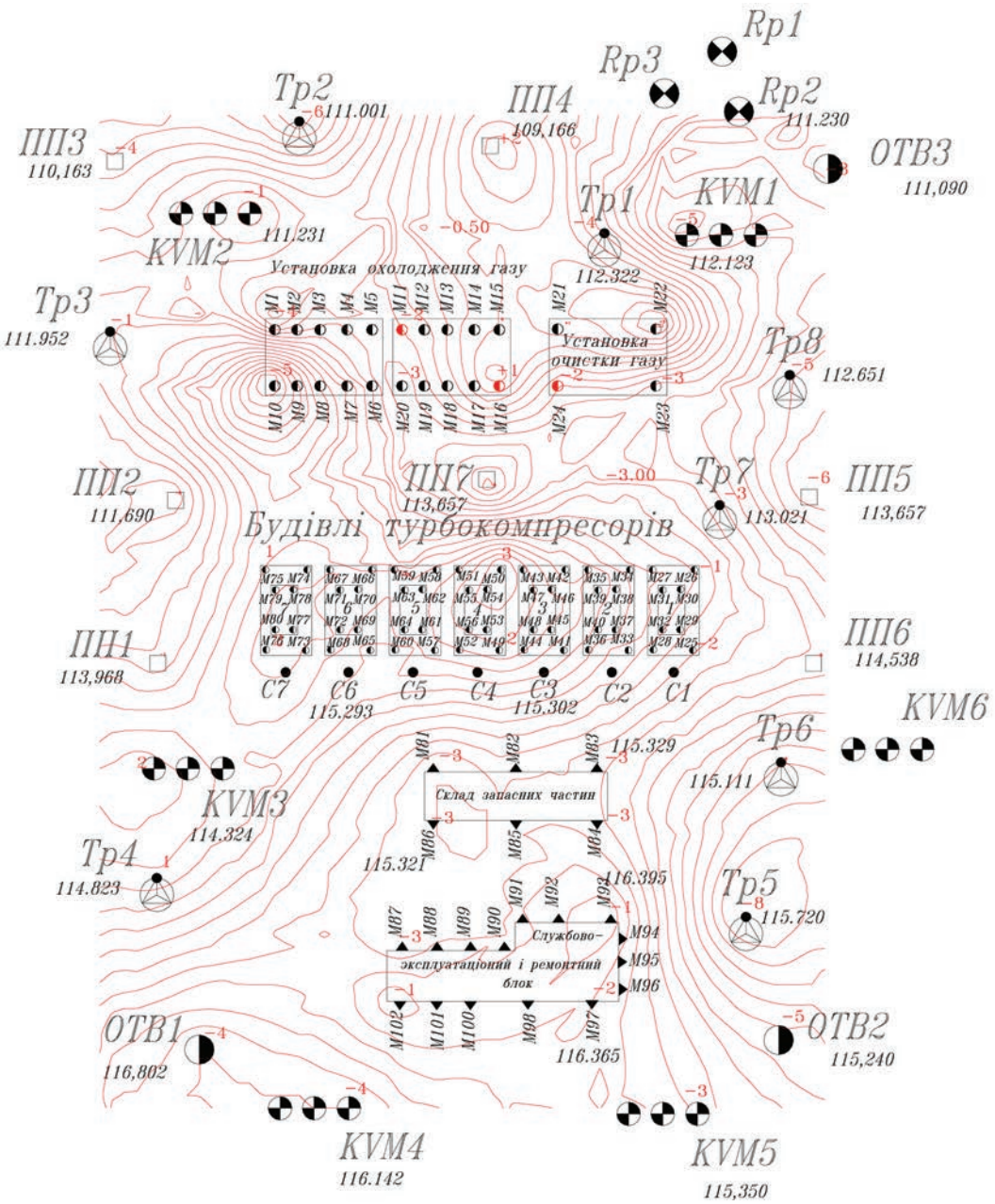


Рис. 12. Ізолінії вертикальних зсувів всієї території компресорної станції (умовні позначки ті, що і на рис. 7)

Сукупність автоматичної гідростатичної системи нівелювання, тахеометрів і зворотних висків дозволяють створити автоматичну систему геодезичного моніторингу устаткування газотранспортних систем. Причому спостереження за осіданням й визначення горизонтальних зсувів будуть виконуватися у повністю автоматичному режимі, а для вимірів горизонтальних зсувів операторові буде необхідно тільки послідовно встановити тахеометр на всі

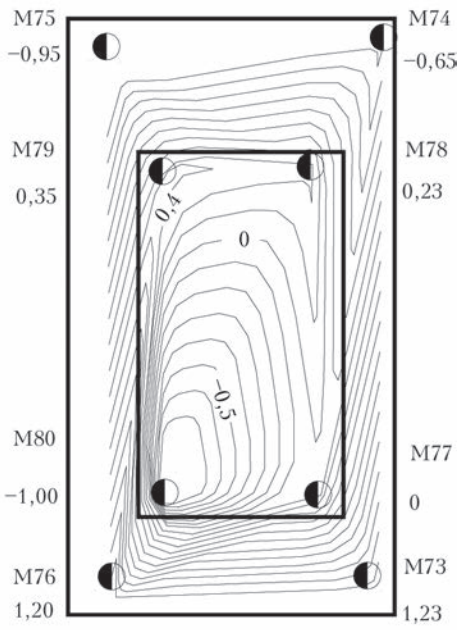


Рис. 13. Ізолінії відносних осідань фундаменту агрегату ТГ1

опорні точки, орієнтуючи його у режимі «Автонаведення» і виконати вимір.

Результати вимірів представляється у вигляді таблиць, графіків і у вигляді планів ізоліній.

На рис. 12–14 надані варіанти подання результатів вимірів.

Висновки

Розглянуто основні положення програми геодезичного моніторингу обладнання компресорних станцій газотранспортної системи України. При виконанні робіт автори прагнули вирішити технічні проблеми на сучасному технічному рівні.

Реалізація запропонованих пропозицій дозволить створити автоматичні вимірювальні системи, які можуть забезпечити оперативний контроль осідань фундаментів обладнання компресорних станцій магістрального газопроводу з достатньою точністю 0,2 мм у вертикальній площині та 2 мм при горизонтальному зсуві.

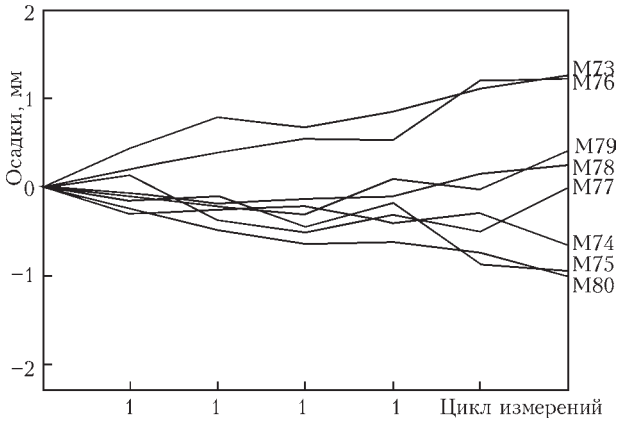


Рис. 14. Графік осідання фундаменту турбокомпресора № 1

Всі запропоновані розробки базуються на вітчизняних технологіях.

1. Криворучко В. Т. Разработка пространственной автоматизированной системы гидростатического нивелирования / В. Т. Криворучко: дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: 61 85-5/3989: 05.24.01. – Киев, 1983. – 160 с.
2. Навальнев Н. И. Использование метода рентгенофлюоресцентного анализа при трибодиагностике газоперекачивающих агрегатов / Н. И. Навальнев, В. Е. Ковтун // Приложение «Диагностика объектов газотранспортной системы» к журналу «Газовая промышленность». – 2011. – № 12.
3. Пинегин С. В. Контактная прочность в машинах / С. В. Пинегин. – М.: Машиностроение, 1965. – 192 с.
4. Зурнаджи В. А. Механика грунтов, основания и фундаменты / В. А. Зурнаджи, В. В. Николаев. – М.: Высшая школа, 1967. – 416 с.

Main problems of organizing geodesic monitoring of compressor stations in the main pipeline are considered. At this stage combining robotic technologies of linear-angular measurements and modern systems for automatic monitoring of subsidence of equipment foundations allows developing an automatic system of geodesic monitoring of gas transportation system equipment. 4 References, 14 Figures.

K e y w o r d s : geodesic monitoring of constructions, Ukrainian gas transportation system, subsidence of foundations.

Надійшла до редакції
05.07.2016

IX конференция
«Сварка и термическая обработка живых тканей. Теория. Практика. Перспективы»
25–26 ноября 2016 г. г. Киев,
ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, 03680, ул. Казимира Малевича, 11
E-mail: office@paton.kiev.ua;
тел.: (044) 205-20-06, 205-17-10

УДК 621.20.14

ДЕФЕКТОСКОПІЯ В АНТАРКТИЦІ: ТЕХНІЧНЕ ДІАГНОСТУВАННЯ РЕЗЕРВУАРА РВС-200 НА УКРАЇНСЬКІЙ АНТАРКТИЧНІЙ СТАНЦІЇ «АКАДЕМІК ВЕРНАДСЬКИЙ»

Ю. М. ПОСИПАЙКО

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України. 03680, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: posypayko@paton.kiev.ua

Описано технологічний процес діагностування вертикального сталевого резервуара РВС-200 на Українській антарктичній станції «Академік Вернадський». Наведені його конструктивні особливості, результати технічного обстеження та розрахунку статичної міцності. Висновки та рекомендації дозволяють розробляти заходи з підвищення надійності роботи резервуара. Бібліогр. 9, рис. 4.

Ключові слова: технічне діагностування, неруйнівний контроль, резервуар сталевий, розрахунок статичної міцності, корозійні пошкодження

Сталеві резервуари для зберігання нафтопродуктів, що знаходяться в експлуатації, підлягають обов'язковому технічному діагностуванню як об'єкти підвищеної небезпеки.

Повне технічне експертне обстеження резервуара передбачає проведення наступних основних робіт:

– вивчення проектної та експлуатаційної документації на резервуар;

– інструментальне обстеження стану фундаменту та основи резервуара;

– інструментальне обстеження стану металоконструкцій резервуара методами неруйнівного контролю з метою виявлення дефектів та пошкоджень у конструкційних елементах та зварних з'єднаннях;

– розрахункова перевірка статичної міцності стінки резервуара;

– оцінка технічного стану резервуара та обґрунтування його придатності для подальшої експлуатації і визначення допустимих умов експлуатації;

– визначення строку чергового технічного діагностування резервуара.

Технічне діагностування (експертне обстеження) резервуара РВС-200, встановленого на Українській антарктичній станції «Академік Вернадський» на острові Галіндез в архіпелазі Аргентинських островів (65°15′ S – 64°16′ W), виконано в січні–лютому 2016 р. Аналіз результатів інструментального обстеження технічного стану металоконструкцій резервуара, контролю якості його зварних з'єднань і розрахунків статичної міцності, розробка висновків та рекомендацій з подальшої експлуатації резервуара зроблені в травні–червні 2016 р. в Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України за участю фахівців з експлуатації та ремонту резервуарних металоконструкцій канд. техн. наук Ю. П. Барвінком та канд. техн. наук А. Ю. Барвінком.

Технічне діагностування резервуара РВС-200 виконано на замовлення ДУ «Національний антарктичний науковий центр» Міністерства освіти і науки України у відповідності з вимогами наступних нормативних документів України:

– Правила технічної експлуатації резервуарів та інструкції по їх ремонту [1];

– Доповнення та зміни до Правил технічної експлуатації резервуарів та інструкції по їх ремонту [2];

– Правила технічної експлуатації та охорони праці на нафтобазах [3];

– ВБН В.2.2-58.2-94. Резервуари вертикальні сталеві для зберігання нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93,3 кПа [4];

– ДСТУ-НБА.3.1-10:2008. Настанова з проведення технічного діагностування вертикальних сталевих резервуарів [5];

– ДБН В.1.2-14–2009. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ [6].

Загальна характеристика резервуара. Резервуар спроектовано ВАТ «УкрНДІпроектстальконструкція ім. В. М. Шимановського» (металоконструкції резервуара) та ВАТ «Інститут транспорту нафти» (технологічна обв'язка резервуара) в 2006 р. в формі двостінного вертикального циліндра, з двома днищами і двома покрівлями, за принципом «стакан в стакані» (рис. 1, 2).

Металоконструкції резервуара виготовлені ТОВ «Кіровоградський завод технологічного обладнання», перевезено в Антарктику і змонтовано з окремих листів, з'єднаних між собою зварюванням, протягом січня-квітня 2007 р.

Геометричні параметри внутрішнього резервуара: висота стінки 5,96 м; внутрішній діаметр

© Ю. М. Посипайко, 2016

Рис. 1. Загальний вид резервуара РВС-200 на УАС «Академік Вернадський»

6,63 м; товщина листів стінки і днища 5 мм; площа днища 34, 5 кв. м.

Геометричні параметри зовнішнього резервуара: висота стінки 6,58 м; внутрішній діаметр 6,96 м; товщина листів стінки 5 мм; товщина листів днища – 8 мм; відстань між стінками внутрішнього та зовнішнього резервуарів 0,16 м.

Покрівля резервуара (внутрішня і зовнішня) складається з двох щитів, які опираються на бортовий кутник стінки. Між собою щити скріплені накладним зварним з'єднанням. Товщина листів настилу покрівлі 4 мм.

Фундаментом резервуара є сім взаємно паралельних залізобетонних стрічок висотою 650 мм над кам'янистою основою, шириною 330 мм в верхній частині і 460 мм – в нижній. Довжина стрічок 8300 мм, ширина 7600 мм.

Фундамент споруджено в 1998 р. за проектом Придніпровського Промбудпроекту, а в 2004 р. було виконано його ремонт. Основою фундаменту є малотріщинувата скеля, в якій пробурені на 500 мм шпури і в них закріплені арматурні випуски – біля 30 шт. на кожній фундаментній стрічці. На поверхні стрічок є металеві закладні пластини розміром 300×200 мм. По залізобетонних стрічках, перпендикулярно їх довжині, укладено 15 стальних балок – двотаврів № 14 (висотою 140 мм), закріплених зварюванням до закладних пластин фундаменту. Ці балки є основою днища резервуара.

Рис. 2. Загальний вид внутрішньої стінки резервуара

Методи та пристрої інструментального діагностування резервуара. При виконанні технічного діагностування резервуара використані такі методи контролю:

– візуальний контроль металоконструкцій та зварних з'єднань;

– інструментальний контроль металоконструкцій та зварних з'єднань;

– контроль герметичності зварних з'єднань днища;

– ультразвуковий контроль товщини листів днища, стінки та покрівлі;

– вимірювальний контроль горизонтальності днища;

– вимірювальний контроль вертикальності стінки;

– розрахункова перевірка статичної міцності стінки.

При виконанні технічного діагностування резервуара використані такі інструменти, прилади та пристрої контролю:

– лупи оглядові, вимірювальні і великого збільшення;

– штангенциркулі, лінійки, рулетки і шаблони зварних швів;

– товщиноміри ультразвукові з п'єзоелектричними перетворювачами і контрольними зразками;

– прямі і кутові вакуумні камери з вакуумметрами;

– вакуумний насос з вакуумним шлангом;

– нівелір і теодоліт з триногою та геодезичною планкою;

– засоби очищення металу (металеві щітки, шпателі, ткані серветки);

– лампи загального та місцевого освітлення;

– драбини на всю висоту стінок;

– фотоапарат.

Технічний стан зовнішнього резервуара. Повний опис виконаних робіт та їх результати наведені в технічному звіті [7]. В цій статті ми зупинимось на їх короткому огляді.

Дві особливості характеризують конструкцію резервуара. Перша, позитивна, – дві герметичні оболонки забезпечують надійну експлуатацію резервуара в умовах екологічно вразливої Антарктики. Друга, негативна, – резервуар не має бокового люка-лазу. Його відсутність ускладнює виконання робіт у резервуарі із зачищення його від осадів, бруду, підтоварної води, діагностування та ремонту. До того ж це не відповідає умовам безпеки персоналу при виконанні робіт. «Заходити» в резервуар можна тільки з покрівлі, через світловий люк, по вертикальній драбині, привареній до внутрішньої стінки.

Резервуар споруджувався в непростих умовах. Антарктичне літо супроводжується вітрами, дощем та снігом. Температура повітря складає 0 ± 5 °С. З огляду на це загальний технічний стан резервуара є задовільним.

Стінка резервуара змонтована з листів розміром 3000×1500 мм (п'ятий пояс – 3000×620 мм) і товщиною 5 мм. Всі зварні з'єднання стикові, односторонні. З'єднання стінки з днищем – кутове, без розробки кромок.

Візуальний контроль стінки резервуара показав, що на поверхні металевих листів відсутні дефекти прокату – тріщини, розшарування, закати, задири, раковини та ін. На поверхні стінки є окремі незначні механічні пошкодження (подряпини, забої) глибиною до 0,5 мм. Корозія поверхні металу під захисним покриттям незначна, на рівні прокатної окалини. Захисне фарбове покриття стінки в основному в хорошому стані. Винятком є окремі ділянки в зоні уторного шва, де в результаті корозійних процесів фарбове покриття злущилось.

Зварні з'єднання в цілому відповідають вимогам проекту, ВБН В.2.2-58.2–94 [4] та ГОСТ 5264–80 [8]. Ширина валиків посилення шва: 12…14 мм (вертикальні шви) і 10…12 мм (горизонтальні шви), висота 1,0…2,5 мм. Катети кутового шва стінки і днища 6…8 мм.

В швах не виявлені недопустимі дефекти зварних з'єднань (поверхневі тріщини, пори, підрізи, пропалини, незаварені кратери та інші), що перевищують допустимі нормами розміри.

В зварних з'єднаннях зустрічаються окремі відхилення форми валика посилення шва, які, проте, не можуть вплинути на експлуатаційні характеристики з'єднання.

У вертикальних з'єднаннях виявлено:

– лінійні зміщення кромок до 1 мм ≈ 4…5 % довжини шва;

– перевищення опуклості зварного шва ≈ 4…5 %;

– бризки металу ≈ 15…20 шт./п. м.

В горизонтальних з'єднаннях виявлено:

– лінійні зміщення кромок до 1 мм ≈ 5…10 % довжини шва;

– перевищення опуклості зварного шва ≈ 3…4 %;

– підріз переривчастий (до 0,5 мм глибиною) верхньої кромки ≈ 10…20 %;

– бризки металу ≈ 15…20 шт./п. м.

В кутовому з'єднанні стінки і днища виявлено: перевищення опуклості кутового шва ≈ 3…5 % та бризки металу ≈ 5…10 шт./п. м.

Товщина листів стінки резервуара відповідає вимогам проекту, ВБН В.2.2-58.2-94 [4] та номінальній товщині, прийнятій в проекті, і складає (5,0 + 0,2) мм.

Для виконання вимірювання горизонтальності днища та вертикальності стінки нівелір і теодоліт встановлювались навколо резервуара на снігових заметах, які цього літа не обіцяли оголити скелі. Треба сказати, що всі показники горизонтальності днища та вертикальності обох стінок в межах чинних нормативів, хоч резервуар монтувався в складних погодних умовах.

Максимальне відхилення твірних резервуара від вертикалі на зовні складає + 22 мм, а в середину – 26 мм. Максимальна різниця точок нівелювання контуру днища складає всього 6 мм.

Стан днища зовнішнього резервуара можна оцінювати частково по його окрайку та видимій частині листів між фундаментними стрічками. Товщина листів окрайка 7,5…7,8 мм. Значна частина окрайка вражена рівномірною атмосферною корозією на глибину до 0,5 мм, захисне фарбове покриття в багатьох місцях відсутнє.

Окрайок днища закріплений зварюванням до кожної балки-двотавра, на які воно укладено, а балки-двотаври, в свою чергу, приварені до закладних пластин фундаменту. Днище приварено до двотаврів також між фундаментними стрічками.

Розрахункові перевірки міцності стінки. Оцінка міцності сталевих резервуарів, що знаходяться в експлуатації, здійснюється на основі результатів їх технічного обстеження із застосуванням загальної схеми розрахунку будівельних конструкцій за граничними станами [2]. У загальному вигляді умова міцності для будь-якого конструктивного елемента записується таким чином:

$$\sigma \le \gamma R\,, \qquad (1)$$

де σ – розрахункова (максимально можлива) величина напружень в елементі конструкції, яка визначається відповідним розрахунком; R – допустима величина напружень для елемента конструкції; для поясів стінки зі Ст.3пс – R = 2450 кгс/см^2; γ – коефіцієнт умов роботи, який визначається нормативними документами. Для першого та другого поясів стінки згідно ВБН В.2.2-58.2–94 [4], γ = 0,6 та 0,7 відповідно.

Умова (1) повинна виконуватись для всіх елементів конструкції, що підлягають перевірці на міцність, і, перш за все, для стінки – головного несучого елементу резервуара.

Розрахункову величину напружень в i-му поясі циліндричної стінки резервуара визначають за формулою:

$$\sigma_i = P_i r / t_i\,, \qquad (2)$$

де P_i – розрахунковий тиск для i-го пояса; r – радіус циліндричної стінки резервуара; t_i – товщина пояса, яка розраховується за результатом товщинометрії.

Розрахунок величини кільцевого напруження в першому та другому поясах циліндричної стінки резервуара, виходячи з фактичних товщин листів металу та при умові максимального заповнення резервуара, виконується за формулою:

$$\sigma = \frac{\left[\left(H - x\right)\rho n_1 + p n_2\right] r}{t} \le \gamma R, \qquad (3)$$

де H – висота резервуара, см; x – висота поясу, на якій кільцеві напруження досягають максимального значення.

Для першого поясу x = 30, для другого x = = 30 + h_1, де h_1 – висота першого поясу; ρ – густина нафтопродукту, кг/см^3, для розрахунку приймається ρ = 0,0009 кг/см^3, що дещо перевищує фактичне значення; p – допустимий надлишковий тиск в газовому просторі резервуара; p = 0,02 кг/см^2; n_1 – коефіцієнт надійності за гідравлічним тиском, n_1 = 1,1; n_2 – коефіцієнт надійності за надлишковим тиском, n_2 = 1,2; r – радіус резервуара, см; t – товщина 1-го (t_1) або 2-го (t_2) поясів стінки, яка розраховується за результатом товщинометрії металу.

Розрахункову товщину поясу стінки визначають як мінімальне значення з середніх значень товщини.

При розрахунку кільцевого напруження в першому та другому поясах стінки у вище наведеній формулі необхідно прийняти: H = 658 см, x_1 = 30 см, x_2 = 180 см, r = 350 см, t_1 = 0,50 см; t_2 = 0,50 см.

Розрахунок кільцевого напруження в першому (σ_1) та другому (σ_2) поясах стінки по середньому значенню товщин (t_1 = 0,50 см; t_2 = 0,50 см):

σ_1 = [1,1(658-30)0,0009 + 1,2·0,02] 350/0,50 = = 452 (кгс/см^2);

σ_2 = [1,1(658-180)0,0009 + 1,2·0,02] 350/0,50 = = 348 (кгс/см^2).

Як видно з розрахунку, умова міцності (1) виконується зі значним запасом:

σ_1 = 452 (кгс/см^2) < γR = 0,6·2450 (кгс/см^2) = = 1470 (кгс/см^2);

σ_2 = 348 (кгс/см^2) < γR = 0,7·2450 (кгс/см^2) = = 1715 (кгс/см^2).

За результатами нівелювання зовнішнього контуру днища визначено параметр ΔU_k, що характеризує нерівномірність осідання, та Θ_k, що характеризує загальний крен резервуара [2].

Параметр $\Delta U_к$ визначається для кожної контрольної точки за формулою:

$$\Pi\Delta U_i = U_i - 0{,}5(U_{i+1} + U_{i-1}), \qquad (4)$$

де U_i – позначка i-ї точки, що розглядається; U_{i+1} та U_{i-1} – позначки сусідніх точок відповідно праворуч та ліворуч від тієї, що розглядається.

Значення параметра ΔU_i нерівномірності осідання днища для порожнього резервуару типу РВС-200 відповідає вимогам ВБН В.2.2-58.2–94 [4], і складає 4, а його допустиме значення – 40.

Параметр Θ_k визначається за формулою:

$$\Theta_k = \frac{1}{R}\sqrt{b_k^2 + c_k^2}, \qquad (5)$$

де $b_k = \frac{2}{n}\sum_{i=1}^{n} U_i \cos\varphi_i$; (6)

$$c_k = \frac{2}{n}\sum_{i=1}^{n} U_i \sin\varphi_i; \qquad (7)$$

φ_i – полярний кут i-ї точки; n – загальна кількість контрольних точок; R – радіус резервуара.

Значення параметра Θ_k загального крену для порожнього резервуара відповідає вимогам ВБН В.2.2-58.2–94 [4] і складає 0,0004, а його допустиме значення – 0,006.

Технічний стан внутрішнього резервуара. *Стінка внутрішнього резервуара* відрізняється тим, що зварні з'єднання виконані з повним проплавом, з двох сторін, оскільки ця стінка монтувалась першою. Вона вкрита осадом – парафіном, що утворився під час зберігання дизельного пального (рис. 2).

Візуальний контроль стінки резервуара показав, що на поверхні листів та в зварних з'єднаннях відсутні недопустимі дефекти. Ширина валиків посилення шва: 12…14 мм (вертикальні шви) і 10…12 мм (горизонтальні шви), висота 1,0...2,5 мм.

В зварних з'єднаннях зустрічаються окремі відхилення форми валика посилення шва, які, проте, не можуть вплинути на експлуатаційні характеристики з'єднань. У вертикальних з'єднаннях виявлено лінійні зміщення кромок до 1 мм ≈ 2…4 % довжини шва, перевищення опуклості зварного шва ≈ 4…6 %, бризки металу ≈ 10…20 шт./м. В горизонтальних з'єднаннях виявлено лінійні зміщення кромок до 1 мм ≈ 5…10 % довжини шва, перевищення опуклості зварного шва ≈ 2…4 %, підріз переривчастий (до 0,5 мм глибиною) верхньої кромки ≈ 10…20 %, бризки металу ≈ 15…20 шт./м. В кутовому з'єднанні стін-

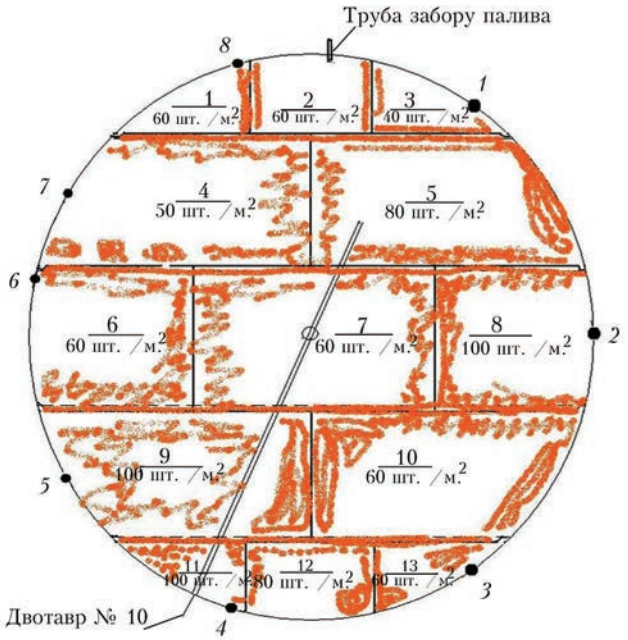


Рис. 3. Схема корозійних пошкоджень днища внутрішнього резервуара

Рис. 4. Загальний вид корозійних пошкоджень днища

ки і днища виявлені перевищення опуклості кутового шва ≈ 3…5 %, бризки металу ≈ 5…10 шт./м.

Вертикальність стінки внутрішнього резервуара виміряна за допомогою виска, що закріплювався під покрівлею П-подібним магнітом та приставної драбини на всю висоту стінки. Максимальне відхилення твірних стінки від вертикалі на зовні складає + 38 мм, а в середину – 31 мм. Максимальна різниця точок нівелювання контуру днища складає всього 6 мм.

Днище внутрішнього резервуара виготовлено із сталевих листів, товщиною 5,0...5,2 мм. Листи зібрані в полоси стиковими зварними з'єднаннями, а між собою полоси з'єднані в наклад.

Зовнішній огляд та візуальний контроль днища резервуара показали, що поверхня металевих листів та зварні з'єднання вражені язвовою корозією глибиною до 2,0 мм. Корозійні язви різної глибини згруповані на окремих ділянках площею 10…20 см^2 і розкидані по листах переважно вздовж зварних з'єднань.

Схема корозійних пошкоджень днища резервуара показана на рис. 3.

Загальний вид корозійних пошкоджень днища показано на рис. 4.

Контроль герметичності зварних з'єднань днища виконано з метою виявлення наскрізних пошкоджень – течей. Контроль герметичності виконано методом вакуумування [9]. При цьому використані вакуумні камери, розроблені та виготовлені ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України (проект НК-175) та вакуумний насос 2НВР-1Д. Течі в зварних швах не виявлені.

На покрівлі резервуара встановлені замірний люк DN150, непримерзаючий мембранний дихальний клапан DN100, клапан запобіжний гід-

равлічний DN100 та два світлових люка діаметром 600 мм, один з яких виконує роль люка-лазу.

В днищі резервуара між стрічками фундаменту встановлено патрубок з вентилем для спуску підтоварної води з резервуара та патрубок з вентилем для спуску води, що конденсується в міжстінному об'ємі резервуара.

Висновки та рекомендації

Аналіз результатів експертного обстеження технічного стану резервуара РВС-200, розташованого на Українській антарктичній станції «Академік Вернадський», дозволяє зробити наступні висновки.

Статична міцність стінки зовнішнього та внутрішнього резервуарів, днище та покрівля зовнішнього резервуара відповідає проекту та діючим нормативам. Всі елементи резервуара (за виключенням днища внутрішнього резервуара) мають задовільний технічний стан, що характеризується незначними відступами від вимог проекту, чинних норм на проектування, виготовлення і монтаж резервуара, які не впливають на його працездатність. Це дозволяє продовжити експлуатацію резервуара РВС-200 до 1.06.2019 р. за умови виконання заходів по зупиненню корозійних процесів на днищі внутрішнього резервуара.

Конструктивним елементом резервуара, який отримав найбільше пошкодження в процесі експлуатації у вигляді язвової корозії, є днище внутрішнього резервуара. Язвова корозія спостерігається практично по всьому днищу глибиною до 2,0 мм, що складає до 40 % проектної товщини. Корозійні язви глибиною 1,0...1,5 мм є також в зварних з'єднаннях. Корозійні язви різної глибини згруповані на окремих ділянках площею 10…20 см^2 і розташовані на поверхні листів переважно вздовж зварних з'єднань.

Враховуючи, що норматив відбракування днища при його корозійному враженні складає 50 % від номінальної товщини, технічний стан внутрішнього днища можна характеризувати як близький до критичного через високу ймовірность подальшого розвитку корозійних процесів.

Резервуар РВС-200, враховуючи його місцезнаходження, відноситься до вищого класу небезпеки СС3 як об'єкт для зберігання екологічно небезпечних речовин. Термін його експлуатації повинен складати не менше 40 років [6]. З точки зору експлуатаційної довговічності слід значну увагу приділити зупиненню корозійних процесів листів днища внутрішнього резервуара.

Для зупинення корозійних процесів необхідно розробити проектну документацію та виконати улаштування поверх існуючого днища нового захисного днища з аустенітної корозійностійкої листової сталі товщиною не менше 2,5 мм.

Слід вирішити питання влаштування люка-лазу в першому поясі резервуара згідно проекту, що дозволить підвищити безпеку виконання робіт в резервуарі та покращити умови його експлуатації.

Необхідно нанести захисне покриття на ділянки з рівномірною атмосферною корозією, що виявлені на зовнішній стінці в уторній зоні, на окрайку зовнішнього днища, на листах покрівлі, на несучих балках-двотаврах, які є основою резервуара.

Необхідно нанести захисне покриття на залізобетонні стрічки фундаменту резервуара.

Вказаний термін експлуатації резервуара – до 1.06.2019 р., після виконання ремонту у відповідності до рекомендацій буде переглянуто з метою його продовження та призначене чергове діагностування. У разі непроведення ремонтних робіт до 01.06.2019 р. резервуар повинен бути виведений із експлуатації.

1. Правила технічної експлуатації резервуарів та інструкції по їх ремонту. – М.: Недра, 1988. – 264 с.
2. Доповнення та зміни до «Правил технічної експлуатації резервуарів та інструкцій по їх ремонту». – К.: УО «Укрнафтопродукт», 1997. – 121 с.
3. Правила технічної експлуатації та охорони праці на нафтобазах. – К.: УО «Укрнафтопродукт», 1998 – 220 с.
4. ВБН В.2.2-58.2–94. Резервуари вертикальні сталеві для зберігання нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93,3 кПа. – К.: Держкомнафтогаз, 1994. – 98 с.
5. ДСТУ-Н Б А.3.1-10:2008. Настанова з проведення технічного діагностування вертикальних сталевих резервуарів. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 14 с.
6. ДБН В.1.2-14–2009. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 32 с.
7. Технічний звіт (експертний висновок) про технічний стан резервуара РВС-200, встановленого на Українській антарктичній станції «Академік Вернадський». – К.: ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН Україні, 2016. – 59 с.
8. ГОСТ 5264–80. Ручне дугове зварювання. З'єднання зварні. Основні типи, конструктивні елементи та розміри.
9. ГОСТ 3242–79. З'єднання зварні. Методи контролю якості.

Technology of diagnostics of vertical steel tank RVS-200 in Ukrainian Antarctic station «Akademik Vernadskii» is described. Its design features, results of technical examination and static strength analysis are given. These conclusions and recommendations allow developing measures to improve the reliability of tank operation.

K e y w o r d s : technical diagnostics, nondestructive testing, steel tank, static strength analysis, corrosion damage.

Надійшла до редакції
21.10.2016

УДК 621.039

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЫСОКОВЯЗКИХ ДЕМПФЕРОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ФИЛЬТРОВ АЭС С РЕАКТОРАМИ ВВЭР-1000

В. В. КИРИЧОК, А. А. ПЕРЕПИЧАЙ, В. М. ТОРОП

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: torop@paton.kiev.ua

Рассмотрены методы расчета сейсмостойкости оборудования АЭС и методы уменьшения сейсмических нагрузок от примыкающих трубопроводов. Обсуждены особенности применения высоковязких демпферов и других сейсмических ограничителей для трубопроводов АЭС с целью уменьшения нагрузок на патрубки оборудования при сейсмических воздействиях. Библиогр. 2, рис. 3.

Ключевые слова: сейсмостойкость, расчеты на прочность, высоковязкий демпфер, трубопроводы, оборудование АЭС

В рамках работы по продлению ресурса трубопроводов и оборудования АЭС проведена оценка сейсмостойкости высокотемпературного фильтра. Высокотемпературные фильтры входят в состав оборудования первого контура АЭС с реакторами ВВЭР-1000 и предназначены для непрерывной очистки теплоносителя от радиоактивных продуктов коррозии материалов контура.

Согласно [1], трубопроводы и оборудование АЭС рассчитываются при сочетании нагрузок «нормальные условия эксплуатации + максимальное расчетное землетрясение» (НУЭ+МРЗ). В отдельных случаях, кроме этих режимов, следует учитывать нагрузки от сейсмического смещения опор. Однако по причине особенностей расположения высокотемпературного фильтра и примыкающих к нему трубопроводов в зданиях АЭС, нагрузки от сейсмического смещения опор незначительны и при оценке сейсмостойкости ими можно пренебречь.

Расчет сейсмостойкости высокотемпературного фильтра по общепринятым методикам включает расчет примыкающих трубопроводов с целью получения нагрузок на патрубки при рабочих нагрузках и сейсмическому воздействию, расчет при рабочих и сейсмических нагрузках собственно самого сосуда давления. При расчете нагрузок от примыкающих трубопроводов оборудование, к которому они подходят, принято считать жесткой заделкой. Для расчета трубопроводов существуют специальные программные комплексы, с помощью которых можно получить нагрузки на опорах и информацию о трубопроводе под воздействием приложенных нагрузок. Расчет для примыкающих трубопроводов температурного фильтра проводился с использованием программного комплекса dPipe линейно-спектральным методом. При этом учитывалась податливость патрубков фильтра. Соответствующие жесткости были учтены при расчете усилий от трубопровода на патрубки. Расчет самого сосуда давления проводился в программном комплексе Abaqus линейно-спектральным методом. При расчете консервативно использовались спектры ответа энергоблока при максимальном пиковом ускорении на грунте, равном 0,17g. Прикладывались спектры ответа в двух горизонтальных и вертикальном направлениях. Суммирование происходило по процедуре SRSS (квадратный корень из суммы квадратов всех возбуждений). Демпфирование принималось 5 %. Условия эксплуатации высокотемпературного фильтра: давление 18 МПа; температура 350 °С; среда – вода 1-го контура; материал – Х18Н10Т.

Сейсмический расчет высокотемпературного фильтра без учета нагрузок на патрубки показал, что максимальные напряжения составляют порядка 13 МПа и при этом концентрируются в опоре фильтра. В режиме нормальных условий эксплуатации условия статической прочности фильтра с учетом нагрузок на патрубки выполняются и при этом максимальные напряжения достигают 149 МПа при допускаемых 153 МПа. При сейсмическом расчете фильтра на максимальное расчетное землетрясение с учетом нагрузок на патрубки (+НУЭ) было определено, что максимальные напряжения составили 318 МПа при допускаемых 212 МПа (рис. 1). При этом концентрация напряжений с превышением допуска наблюдалась на нижнем патрубке фильтра.

Для возможности дальнейшей безопасной эксплуатации фильтра необходимо провести компенсирующие мероприятия с тем, чтобы эквивалентные напряжения не превышали допускаемые. К таким мероприятиям относят изменение геоме-

© В. В. Киричок, А. А. Перепичай, В. М. Тороп, 2016

трии трубопроводов и сосуда или изменение опорно-подвесной системы. На практике, как правило, изменяют опорно-подвесную систему. Процесс расстановки дополнительных опор является сложной комплексной задачей. При этом нужно помнить, что установка дополнительной опоры приводит к перераспределению нагрузок на остальных опорах и подвесках, изменяются собственные частоты трубопровода. Существует также проблема натяжения пружинных подвесок после изменения нагрузок на них. При увеличении жесткости трубопроводной системы может ухудшиться картина по циклической прочности и условиям работы при НУЭ, и при рекомендациях по улучшению сейсмостойкости на такие моменты нужно обращать особое внимание. Также бывают случаи, когда установка дополнительных опор приводит к усилению вибрации трубопровода, что негативно сказывается на трубопроводе и обслуживающем персонале.

При рекомендации по установке дополнительных опор следует также принимать во внимание возможность установки такой опоры в том месте, в котором рекомендует эксплуатирующая и проектная организация.

Была попытка решения задачи путем установки дополнительных опор-ограничителей, которые вступают в действие при землетрясении. Для этого рассчитывались перемещения на участках трубопроводов при НУЭ. Сейсмические ограничители при этом играют роль опоры, у которой зазор с трубопроводом больше перемещений, возникающих при НУЭ.

Для данного трубопровода было определено, что в двух направлениях перемещения при НУЭ больше, чем перемещения, вызванные ответными ускорениями при землетрясении. Поэтому ограничители с зазором в этом случае не являются эффективным решением указанной выше проблемы.

При расчете трубопровода с дополнительными скользящими и направляющими опорами были получены значительно меньшие сейсмические нагрузки на патрубки фильтра, однако эквивалентные напряжения все же превышали допускаемые при сочетании нагрузок НУЭ+МРЗ, поскольку если мы используем дополнительные скользящие и направляющие опоры на рассматриваемом трубопроводе, то они значительным образом влияют на работу этого трубопровода при НУЭ. Такой подход хоть и позволяет снизить моменты сил на патрубок фильтра, однако значительным образом повышает напряжения из-за больших температурных усилий. В итоге для данной ситуации не удалось достичь желаемого результата, используя механические ограничители.

Таким образом, в подобных случаях целесообразно устанавливать динамические амортизаторы или высоковязкие демпферы и использовать для расчета сейсмических напряжений метод динамического анализа, который более сложный в моделировании, однако при наличии зазоров и нелинейностей в системе дает более точные результаты. Такие устройства мало влияют на трубопровод при НУЭ и циклических нагрузках, однако позволяют повысить жесткость трубопроводной системы при сейсмических возбуждениях.

Существенным недостатком динамических амортизаторов является то, что их следует устанавливать во всех направлениях возникновения усилий от сейсмических возбуждений. Кроме того, для крепления каждого амортизатора необходимо устанавливать опорную конструкцию. К недостаткам такого антисейсмического устройства относятся также возможные утечки масла и необходимость в частом и дорогостоящем техническом обслуживании.

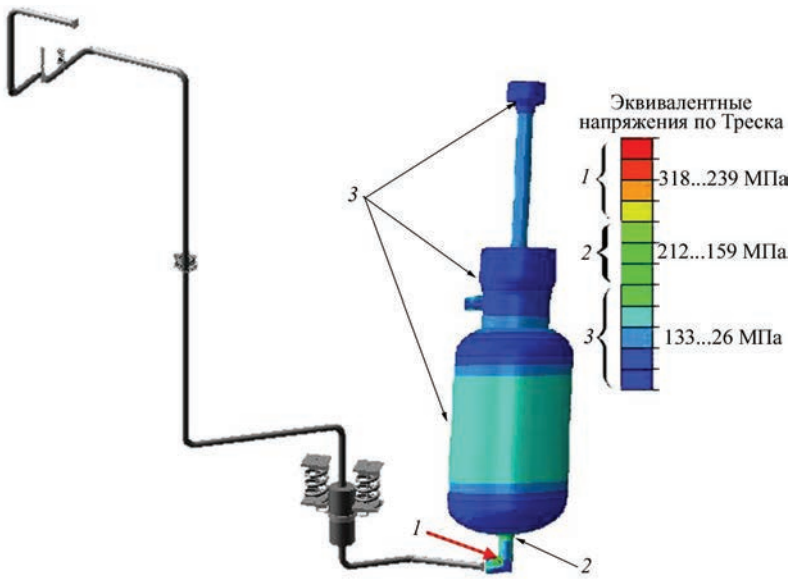


Рис. 1. Эквивалентные напряжения в фильтре при НУЭ+МРЗ для указанной конфигурации примыкающего трубопровода

Принимая во внимание перечисленные выше особенности, наиболее подходящим компенсирующим мероприятием, на наш взгляд, является установка высоковязких демпферов на проблемных участках трубопроводов. Конструкция высоковязкого демпфера представляет собой корпус, наполненный вязкой жидкостью и погруженный в эту жидкость поршень, который жестко связан с трубопроводом (рис. 2). Демпфер закрепляют неподвижно за основание только в вертикальном положении, чтобы предотвратить вытекание высоковязкой жидкости. При сейсмическом возбуждении высоковязкая жидкость мешает поршню совершать резкие линейные перемещения, работая при этом как неподвижная трехкомпонентная опора

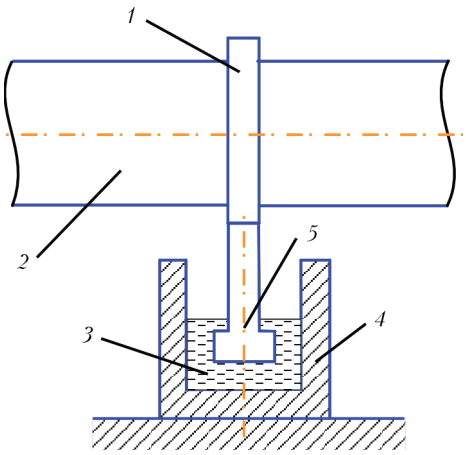


Рис. 2. Схематическое представление высоковязкого демпфера: *1* – крепежный хомут; *2* – трубопровод; *3* – высоковязкая жидкость; *4* – корпус; *5* – корпус

с определенной жесткостью. При плавном нагружении демпфер не влияет на работу трубопровода. Также он способствует уменьшению вибраций. Таким образом, правильно подобранный и установленный демпфер не наносит вред трубопроводу и после его установки расчеты для всех режимов эксплуатации, кроме вибропрочности и сейсмостойкости, остаются неизменными.

Международный опыт использования высоковязких демпферов [2] показывает, что это самый простой и эффективный способ по борьбе с вибрациями и сейсмическими нагрузками. Несмотря на то, что в украинской атомной энергетике отсутствуют нормы по применению высоковязких демпферов, в отдельных случаях они были установлены на АЭС и теперь успешно выполняют свое назначение.

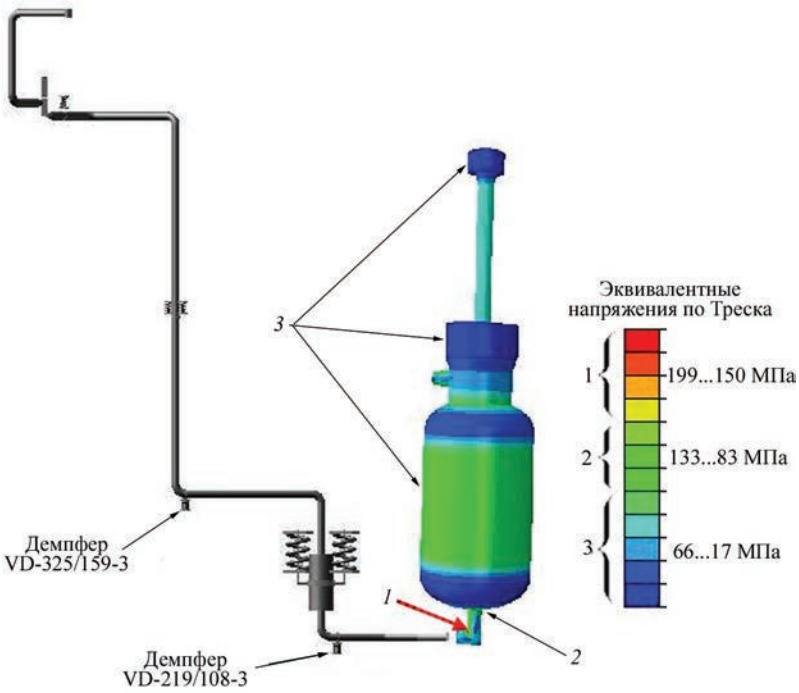


Рис. 3. Эквивалентные напряжения в фильтре при НУЭ+МРЗ для указанной конфигурации примыкающего трубопровода с установленными демпферами

Подбирая демпфер, нужно учитывать допускаемые нагрузки на антисейсмическое устройство и допускаемые перемещения поршня в корпусе. При этом на допускаемые перемещения демпфера нужно обращать особое внимание, так как их превышение от температурных нагрузок во время работы трубопровода может привести к разрушению трубопровода или опоры демпфера. При расчете трубопроводов с демпферами в основном используется упругая модель, вязкая и максфелловская.

Максфелловская модель является наиболее точной и сложной в расчетах, однако возможность использования консервативного подхода в атомной энергетике позволяет использовать наиболее простую упругую модель. При этом идеально вязкая модель не является консервативной по сравнению с максфелловской. При использовании в расчете упругой модели расчетчик, исходя из модального анализа трубопровода и спектров ответа, сам задает характерную частоту демпфера, которая характеризует жесткость антисейсмического ограничителя.

Частотные характеристики демпферов, которые используются в атомной энергетике, представляют собой зависимость динамической жесткости демпфера от частоты возбуждения. При этом жесткость демпфера возрастает с увеличением частоты колебаний до некоторого значения, после которого она начинает падать. Как правило, при частоте выше 40 Гц демпфер становится менее эффективным. Однако этого диапазона достаточно для повышения сейсмостойкости трубопроводов и оборудования АЭС.

Расчет трубопровода с использованием демпферов выполнен в dPipe в упругой постановке. На модели трубопровода были установлены два демпфера типа VD, с помощью которых удалось в несколько раз снизить сейсмические нагрузки и получить напряжения на патрубке ниже допускаемых при сочетании нагрузок НУЭ+МРЗ. Результаты расчетов приведены на рис. 3.

Выводы

Подтверждена необходимость учета внештатных режимов эксплуатации оборудования и трубопроводов при проведении компенсирующих мероприятий, направленных на повышение сейсмостойкости АЭС.

Внедрена практика использования высоковязких демпферов серии VD для уменьшения сейсмических напряжений высокотемпературного филь-

тра, для которого не выполняются условия сейсмостойкости, согласно [1].

1. ПНАЭ Г-7-002–86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.

2. Повышение надежности и ресурса трубопроводов с использованием технологии высоковязкого демпфера / В. Н. Алексеев, А. М. Берковский, П. С. Васильев [и др.] // Прочность и ресурс энергооборудования: Тр. НПО ЦКТИ. СПб: НПО ЦКТИ, 2002. – Вып. 291. – С. 215–230.

Methods of calculation of NPP equipment seismoresistance and methods to reduce seismic loads from abutting piping are considered. Features of application of high-viscosity dampers and other seismic limiters for NPP piping are discussed, in order to reduce the loads on equipment fittings at seismic impact. 2 References, 3 Figures.

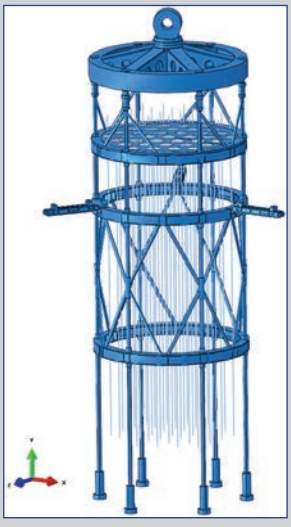
Keywords: seismic resistance, strength analysis, highly-viscous damper, piping, NPP equipment

Поступила в редакцию
26.09.2016

ОБОСНОВАНИЕ СВЕРХПРОЕКТНОГО СРОКА ЭКСПЛУАТАЦИИ СОСУДОВ, РАБОТАЮЩИХ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

На многих промышленных предприятиях техническое оборудование исчерпало свой проектный ресурс. В связи с этим актуальной проблемой является обоснование сверхпроектной надежной эксплуатации оборудования повышенной опасности, к которому относятся сосуды, работающие под давлением, а также трубопроводы, резервуары, баллоны, колонны и реакторы химических и нефтехимических производств, ТЭС, АЭС и т.п. Для обоснованного назначения сверхпроектного срока эксплуатации в отделе «Новые конструктивные формы сварных соединений и конструкций» Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины разрабатываются информационно-аналитические системы управления старением указанного оборудования, которые в режиме мониторинга позволяют оценивать их фактическое техническое состояние и прогнозировать остаточный ресурс. Используя современные методы технической диагностики и неразрушающего контроля, программно-методические комплексы (в том числе и коммерческие продукты АСТРА-АЭС, dPIPE, ABAQUS, ANSYS, SYSWELD и др.), экспериментальное оборудование сертифицированной лаборатории, позволяющее испытывать не только образцы но и натурные крупногабаритные изделия, накопленный многолетний опыт научных исследований и созданные базы данных, отдел способен решать сложные научно-технические проблемы, возникающие на промышленных предприятиях Украины.

Сертифицированная лаборатория для испытаний внутренним гидравлическим давлением изделий длиной до 10000 мм и диаметром до 1400 мм в поперечном сечении с возможностью разрушения:
- статическим давлением до 100 МПа с расходом 60 л/час;
- циклическим давлением до 60 МПа с расходом 800 л/час.



Расчетное обоснование дополнительного раскрепления металлоконструкций верхних блоков энергоблоков №1, 2 ОП РАЭС от внешних динамических воздействий;

МКЭ-модель в ПК ABAQUS.

03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11
Тел.: (044) 2006457, моб.: (067) 4490562,
E-mail: v.torop@gmail.com,

УДК 621.30.12

ТЕХНОЛОГІЧНЕ УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ ВИРОБІВ У ЗВАРЮВАЛЬНОМУ ВИРОБНИЦТВІ

А. Г. ПОТАП'ЄВСЬКИЙ, Ю. К. БОНДАРЕНКО, Ю. В. ЛОГІНОВА, К. О. АРТЮХ
ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАНУ. 03680, м. Київ-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Досліджена структура якості виробництва зварних металоконструкцій на основі Стандарту ISO 9001–2015 в порівнянні з діючою версією ISO 9001–2008. Версія ISO 9001–2015 доповнена вимогами оцінки ризиків появи дефектів в зварних з'єднаннях, обумовлених використанням несертифікованих зварювальних матеріалів та зварювальних джерел живлення без програм зміни режиму зварювання, забезпечення технічної безпеки при виготовленні металоконструкції. Бібліогр. 13, рис. 1.

Розмова про четверту індустріальну революцію або «індустрію 4.0» ведеться ще з 2014 р. Саме тоді на Всесвітньому економічному форумі в Давосі почалося активне обговорення нової технологічної ери, яка по суті мінімізує внесок людської праці в виробничі процеси, а також значно спростить життя на побутовому рівні за рахунок «розумних» гаджетів і рішень.

Сьогодні ж, як зійшлися на думці учасники форуму, переломний момент нової індустріальної епохи як ніколи близький. Наприклад, засновник давоського форуму Клаус Шваб впевнений, що вже в найближчому майбутньому світ опиниться у полоні штучного розуму, а такі технології, як 3D друк, синтетична біологія, технічна діагностика (ТД) та й у цілому поняття «інтернет-речей», коли всі пристрої, якими користується людина, інтегровані в єдину еко- і цифрову систему, стануть нормою життя.

«Інженери, дизайнери та архітектори будуть використовувати машинне проектування, розробку матеріалів і синтетичну біологію, щоб домогтися симбіозу між мікроорганізмами, нашими тілами, споживаними продуктами і навіть нашими будинками», говорить Клаус Шваб. Наприклад, згідно з даними, озвученими в Давосі, вже до 2025 р. 10 % носитимуть одяг, підключений до Інтернету, а 5 % товарів повсякденного вжитку будуть надруковані на 3D принтерах.

Відповідно, всі ці процеси дають колосальні можливості для розвитку економік багатьох країн. Але тільки за умови, що вони зможуть реалізувати свій людський потенціал, освоїти нові технології і залучити необхідні для цього інвестиції та конструкції.

Сучасна світова промисловість налічує не одну сотню компаній, що спеціалізуються на виробництві продукції для зварювання та НК і ТД. Більшість компаній, що виробляють зварювальне обладнання, матеріали та зварні конструкції, вважають доцільним диверсифікувати своє виробництво і не обмежуватися однією лише зварювальною продукцією, направивши частину ресурсів на виробництво суміжної, а іноді й зовсім не пов'язаної зі зварюванням продукції. Досить часто власне зварювальне виробництво стає стороннім, «непрофільним» виробничим підрозділом, але виконує технічні послуги – НК і ТД виробів з різних матеріалів.

Доцільно було б проаналізувати: наскільки ефективні компанії України, що диверсифікують своє виробництво, можуть задовольнити вимогам конкуренції підприємств в ЄС, зварювання на яких є одним з основних технологічних процесів.

В умовах глобалізації світової економіки і посилення міжнародної та національної конкуренції дуже значущим завданням для будь-якої компанії стає підвищення конкурентоспроможності. Володіння міцної конкурентною позицією є вирішальним чинником, здатним привести компанію до успіху. Тому сьогодні спостерігається пильна увага керівників до маркетингових інструментів, якісного менеджменту, бізнес-інформації. Одним з таких інструментів є конкурентна розвідка, яка дозволяє мінімізувати тимчасові витрати, підвищити ефективність роботи як окремих служб, так і компанії в цілому, і в кінцевому рахунку забезпечити компанію конкурентними перевагами та зменшення ризику в зварювальному виробництві.

Метою подальшого аналізу є розробка практичних рекомендацій з використанням інструментів системи управління якістю (СУЯ) у конкурентній розвідці в компаніях для підвищення їх конкурентоспроможності, ефективності діяльності та стратегічної стійкості, враховуючи нову редакцію нормативного документу ISO 9001:2015 з використанням засобів НК і ТД.

© А. Г. Потап'євський, Ю. К. Бондаренко, Ю. В. Логінова, К. О. Артюх, 2016

Дані технології призначені для тих, хто розуміє важливість підвищення конкурентоспроможності компанії вже сьогодні. Аналіз розрахований як на власників бізнесу, так і на співробітників, які зацікавлені в розвитку машинобудування на ринку України. А так само для тих, хто хоче дізнатися про основні вигоди використання системи менеджменту в бізнесі для зварювального виробництва.

У першу чергу у зварювальному виробництві треба дбати не про спрощення та зниження собівартості свого виробництва, а про необхідність зробити конструкції максимально простими у користуванні і доступними для збуту, а також про збільшення товарообігу.

Структура високого рівня відповідно до ISO 9001:2015 потребує, щоб стандарт складався з десяти розділів:

1) області застосування;

2) нормативних посиланнь;

3) термінів та визначень, що використовуються в стандарті;

4) контексту організації;

5) лідерства в організації;

6) планування (управління ризиками);

7) засобів забезпечення – допоміжних процесів;

8) організації функціонування – основної діяльності;

9) оцінки результатів;

10) заходів поліпшення діяльності організації.

Структура високого рівня містить замкнутий управлінський цикл, тому експерти ISO/TC 176 фактично перекомпонували стару версію ISO 9001:2008 у нову структуру.

Розглянемо всі десять розділів структури міжнародного стандарту ISO 9001:2015.

1. *Область застосування*. Майже повторює розділ 1.1 «Загальні положення» чинного стандарту.

2. *Нормативні посилання*. Стандарт посилається на ISO 9000.

3. *Терміни та визначення*. З метою розгляду стандарту наведено кілька термінів, які визначені ISO 9000:2005, але є й нові, наприклад, «Аутсорсінг», «Ризики».

4. *Контекст організації*. Розуміння організації, включаючи дослідження потреб і очікувань зацікавлених сторін (а не тільки споживача) займає центральне місце в підтримці ведення бізнесу. Організація повинна визначити зовнішні та внутрішні питання, які мають відношення до її мети та стратегічного напрямку – збуту зварних конструкцій.

Практика показала, що в багатьох випадках керівництвом підприємств стандарт сприймався як якась додаткова гілка в системі управління до формального впровадження системи управління якістю і відсутності результатів. Новий стандарт заснований на тому, що система управління якістю повинна органічно вписуватися в загальну систему управління, будуватися за єдиними принципами та мотивувати керівника використовувати стандарт для поліпшення управління організацією в цілому та підвищення безпеки зварної конструкції.

Процесний підхід залишається ключовою концепцією побудови системи управління (п.4.2.2), більше того, в новій версії стандарту цю тезу посилено.

Крім повторення п.4.1 чинної версії в стандарті передбачено нові підпункти з термінами «Ризик», «Показник результативності» та ін.

Практика впровадження стандарту ISO 9001 має численні приклади формального ставлення керівництва. Частина рішень цього питання передається на нижчі рівні управління (службі якості) без належних повноважень і підтримки з боку керівництва.

У новій версії цього міжнародного стандарту 2015 р. визначено, що керівники забезпечують інтеграцію вимог системи управління якістю в загальну бізнес-практику підприємства. Це посилить вимоги до припинення практики розуміння системи управління якості як чогось окремого від загальних принципів управління організацією.

Розділ 6.1 «Заходи по зниженню ризиків і їх можливостей» є нововведенням версії стандарту. Додаток до п. 6.1.2 говорить, що варіанти заходів щодо зниження ризиків і можливостей включає:

– уникнення ризику;

– взяття ризику під контроль;

– усунення джерела ризику;

– зміна ймовірності виникнення ризику і його наслідків;

– прийняття обґрунтованого рішення за ризиком.

Інфраструктура, довкілля, контроль пристроїв для вимірювання та моніторингу, управління знань персоналу в організації, документування інформації мають бути визначені, впроваджені та підтримуватися.

Важливі сукупні знання (уміння всього колективу), учасників проектів, де один доповнює другого.

Стандарт представляє нове поняття «документована інформація» (замість п. 4.2. чинної версії стандарту). Документована інформація визначається як «інформація, а також носій, на якому вона міститься і яка повинна контролюватися і управлятися організацією».

Зазначено лише те, що область застосування системи має бути представлена як «документована інформація».

Замість звичного п.7.4 «Закупівлі» з'являється п.8.4 «Управління зовнішнім забезпеченням товарами та послугами», який встановлює вимоги до зовнішніх постачальників і включає вимоги з аутсорсингу.

Оперативне планування передбачає «дії для ідентифікації та усунення ризиків з досягненням товарів та послуг встановленим вимогам».

Деякі незначні зміни зроблено в розділі «Випуск продукції».

Нові вимоги — це необхідність в документованій інформації, яка описує характеристики товарів та послуг, а також в документованій інформації, яка описує дії, які виконуються, та досягнуті результати. Діяльність після поставки розглядається окремо від виробництва зварних конструкцій та надання технічних послуг з НК і ТД.

Контроль змін, випуск конструкцій та надання технічних послуг, а також управління невідповідними виробами і технічними послугами розглядається в кінці розділу. Контроль змін повторює вимоги до планування змін в Розділі 6 проекту стандарту.

Розділ «Оцінка результатів» перегукується з вимогами версії ISO 9001:2008. Оцінка підсилює вимоги до моніторингу та вимірювань. Відсутня згадка про застосування статистичних методів, але включено вимоги щодо визначення методів моніторингу, вимірювання, аналізу та оцінки для отримання обґрунтованих результатів.

Внутрішні аудити і аналіз з боку керівництва є частиною розділу, на основі якого оцінюється система управління в організації.

Запропоновано використання терміну «поліпшення» замість «постійне поліпшення», так як «поліпшення» і так є основною метою підприємства. Відсутня згадка про запобіжні дії, так як система управління якістю передбачає виявлення ризиків. Стандарт вимагає від організації розглядати і реагувати на невідповідності (дефекти). Якщо необхідно попередити повторне виникнення невідповідностей, то необхідно знайти її причину за допомогою НК і ТД.

Метою даного аналізу є розробка практичних рекомендацій з використанням інструментів системи управління якістю у конкурентній розвідці в компаніях для підвищення їх конкурентоспроможності, ефективності діяльності та стратегічної життєздатності.

У першу чергу система організації зварювального виробництва має дбати не про спрощення та зниження собівартості свого виробництва, а про необхідність зробити обладнання максимально простим в обігу і доступним за ціною, про збільшення товарообігу на складах своїх дистрибуційних центрів. Головний об'єкт досліджень – зварювальний процес, в результаті якого і утворюється зварне з'єднання, вимоги до якого визначив замовник. Зварювальний апарат і електрод – не самоціль, а засіб досягнення поставленого завдання. Звичайно, під «завданням» треба розуміти не тільки технічне завдання тієї чи іншої зварювальної конструкції, але й проблеми, що стоять перед виробництвом в цілому.

Аналіз показав, що розроблена система для виробництва, зварювальна технологія і засоби її реалізації будуть затребувані багатьма виробниками зварних конструкцій, що мають схожі проблеми і вирішують аналогічні завдання з використанням НК і ТД.

Цінність збалансованої системи показників (BSC – balance, score, card) підходу визнана і підтверджена представниками промисловості багатьох країн світу. Про це свідчать тисячі комплектів обладнання і сотні тонн зварювальних матеріалів для виконання конкретних завданнь на підприємствах зварних конструкцій замовників в самих різних галузях промисловості (в зварювальних підприємствах України ще не впроваджено).

Для досягнення успіху компанії в конкуренції на ринку продукції та послуг зварювального виробництва розроблено шляхи швидкого реагування на зміни в технології для переваги над конкурентами в якості продукції, терміну надання послуг, асортименту та ціни.

Проведені дослідження підтвердили, що для досягнення цих цілей необхідно сформулювати стратегію розвитку і виробити заходи їх реалізації для зварювального виробництва.

Оперативне вивчення інформації про діяльність підприємства і його положення на ринку дозволить керівництву визначити стратегію, сформулювати довгострокові цілі.

Проведений аналіз зварювального виробництва показав, що для створення системи поліпшення виробництва оптимальним є використання методології BCS з візуалізацією досягнень за визначений період: зміну–місяць–квартал–рік з метою інформування в цехах та дільницях.

На основі проведеного аналізу та досліджень системи BSC встановлено, що потрібно провести додаткові заходи щодо виконання програми підтримки галузевої політики в машинобудуванні за допомогою BSC – додаток до стандарту ISO 9001:2008 та ISO 9001:2015. На основі досліджень системи BSC встановлено, що матеріальні активи в зварювальному виробництві становлять тільки 15…20 % в формуванні вартості продукції.

На основі проведеного аналізу та досліджень системи BSC встановлено, що для успішного функціонування підприємства необхідні такі чинники: оцінки стану виробництва, оптимальні внутрішні процеси, компетентний персонал,

налагоджена база споживачів продукції – зварних конструкцій та системи 5S разом з НК і ТД. Форма звіту збалансованих цільових показників в цеху зварювального підприємства BSC дозволяє постійно висвітлювати стан справ в підрозділах підприємства. Перед дослідженням системи BSC рекомендується скласти дорожню карту аналізу діяльності кожного підрозділу підприємства.

В результаті досліджень BSC та аналізу процесного підходу встановлено також перелік процесів, які є складовою частиною управління та постачання для внутрішніх процесів підприємств зварювального виробництва. Сформульовано та визначено наступні сегменти BSC зварювального виробництва: підготовку персоналу зварювання, НК і ТД, фінансову ідентифікацію, перелік внутрішніх процесів, перелік споживачів зварних виробів, нормативні вимоги до процесів зварювання та НК і ТД, які лягли в основу номенклатури технологічних процесів зварювання та технічних послуг по НК і ТД, які необхідно затвердити Департаментом технічного регулювання та підтвердження відповідності Міністерства економічного розвитку України. В результаті аналізу розроблено процедури підтвердження відповідності та оцінки стану виробництва зварної продукції різних типів, встановлено, що необхідно розробити процедури постійного моніторингу виробництва (внутрішній аудит) та комплекс інструкцій по вимірюванню і перевірці основних параметрів. В результаті аналізу встановлено, що згідно Закону України від 05.06.2014 № 13150-VII «Про стандартизацію», в зварювальному виробництві для побудови системи BSC та чотирьох сегментів зварювального виробництва необхідно використовувати гармонізовані міжнародні нормативні документи для виготовлення безпечних та якісних елементів та процесів випуску продукції [1–4] з врахуванням НК і ТД.

На підставі проведених досліджень запропоновано систему ключових показників технологічного управління якістю в зварювальному виробництві. Встановлено, що система ключових показників формується на підставі аналізу технологічних процесів виготовлення зварних виробів та НК і ТД. Запропоновано структуру процесів верхнього рівня, пов'язаних з управлінням, постачанням, виробництвом, моніторингом зварювального виробництва та контролем експлуатаційних характеристик зварних конструкцій. Результати досліджень використано при розробці рекомендацій та впровадженні заходів з поліпшення системи управління виробництвом металевих будівельних конструкцій. Проведено дослідження вимог і методів системи BSC для візуалізації досягнутих результатів виробництва згідно з системою поліпшення зварювання та монтажу конструкцій після підготовки виробництва до проведення технічного нагляду (моніторингу) за сертифікованою структурою підприємства по ISO 9001:2008 (ISO 9001:2015). При аналізі факторів підвищення якості продукції та виробів для машинобудування встановлено, що суттєвим є людський фактор: сформована політика та цілі в сфері якості вищого керівництва; мотивація персоналу та розуміння завдань в сфері якості спеціалістами підприємства; рівень координування зварювальних робіт; система перепідготовки та атестації зварників, спеціалістів з НК і ТД [5, 8]. При цьому визначено вимоги до розробки програм підтвердження відповідності технологій зварювання відповідно до вимог впроваджених міжнародних стандартів з врахуванням межі придатності різних схем атестації технологічних процесів зварювання для різних типів продукції та виробництв [4–8].

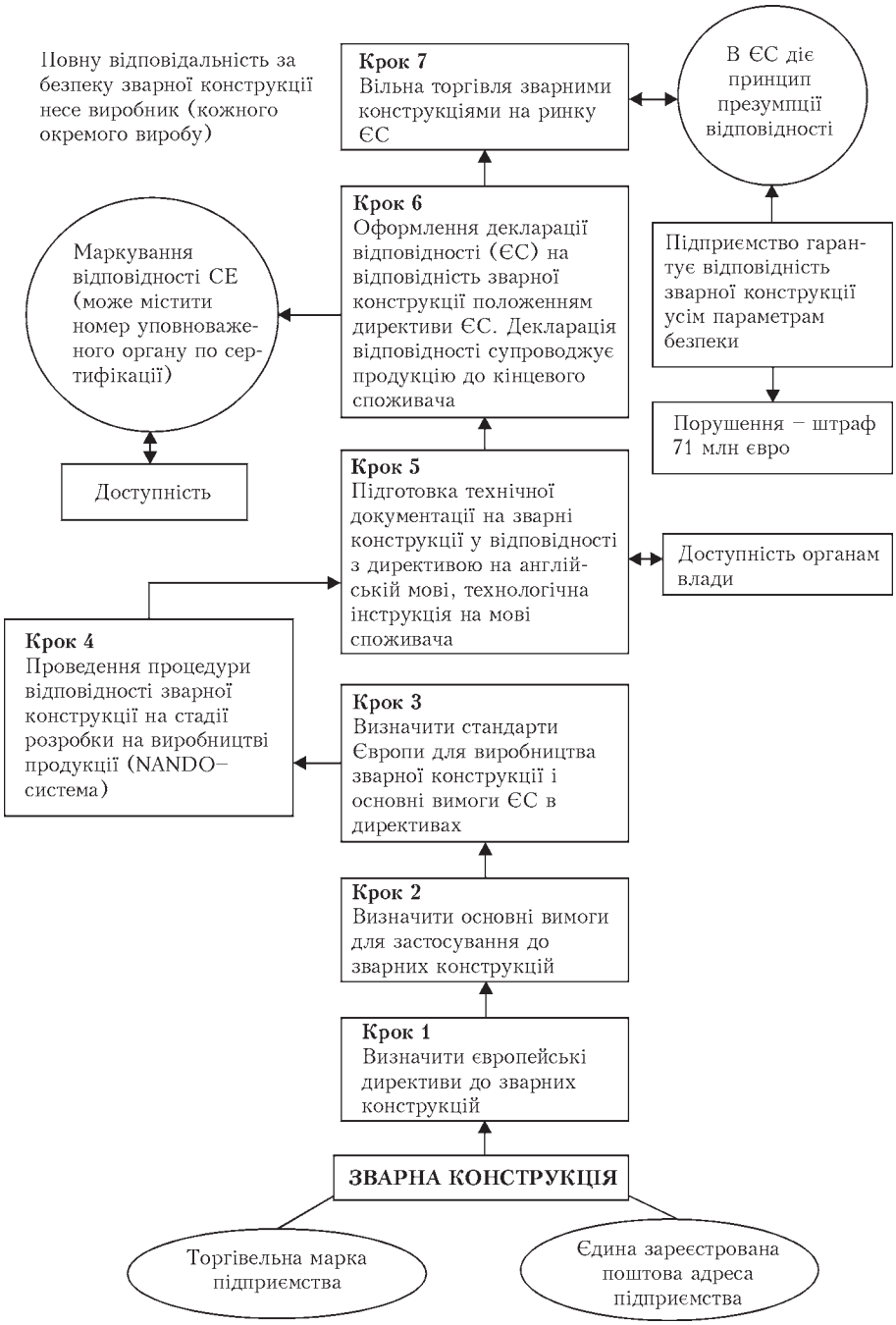
Для доступу зварних конструкцій на ринок ЄС необхідно забезпечити виробництво якісними технологічними процесами зварювання, які гарантують бездефектність зварних конструкцій (рисунок).

В переважній більшості у будівельних конструкціях переважають з'єднання з короткими та замкнутими швами, розміщеними у різних просторових положеннях. Основними проблемами у таких з'єднаннях є недостатність провару у початковій та кінцевій частинах швів, пори та шлакові включення. Ці дефекти суттєво погіршують якість зварних конструкцій.

На даний час до технологій, які забезпечують одержання якісних бездефектних швів, відносяться імпульсно-дугові процеси в аргоні, суміші аргону з вуглекислим газом та в вуглекислому газі тонким дротом з примусовим керуванням термічного циклу при умові використання якісних (сертифікованих) захисних газів, дротів та зварювальних апаратів [1, 2, 13].

При використанні технологій та апаратури без керування струмом та термічним циклом та неякісних (не сертифікованих) зварювальних газів, дротів та джерел живлення, а також при відсутності контролю за виконанням зварювання в з'єднаннях зустрічаються непровари, пори та інші дефекти.

Основними причинами пор є недостатній захист зони зварювання від повітря. Обстеження виробництв, згідно вимог ДСТУ 3957–2000, показали, що в балонах з вуглекислим газом, що поставлені без сертифікатів, часто відмічають підвищений вміст повітря та вологи, ніж це зазначено в ГОСТ 8050–85. Причиною цього в більшості випадків є порушення технології наповнення балонів: балони перед заповненням недостатньо очищають та не осушують, технології заправки не атестовані.



Як вийти на ринок ЄС – інструкція крок за кроком

Аналіз технологій зварювання в вуглекислому газі та в суміші аргон–вуглекислий газ, що виконується на заводах, виявив, що пори у швах з'являються також при виконанні зварювання на підвищених режимах та недостатній подачі захисного газу.

Настройка режима зварювання та супровідний контроль режиму зварювання проводиться на апаратах на робочих постах (по вольтметру. амперметру та регулятору подачі захисного газу). Часто ці прибори не забезпечують достатньої точності параметрів режимів зварювання. Але згідно ДСТУ 3413 та ДСТУ IEC 60974:2003 якість технологічних характеристик зварювальних апаратів не перевіряється. В результаті збільшується ризик появи дефектів у зварних швах [10–12].

Забезпечити одержання якісних бездефектних зварних конструкцій та вихід на ринок Європи можливий при умові організації робіт по виготовленню конструкцій згідно НД. Порядок організації експорту продукції в загальному вигляді представлений на рисунку.

Крім того, необхідно використовувати «Технічний регламент низьковольтного електричного обладнання», введений Законом України «Про технічні регламенти та оцінку відповідності від 15.01.2015, № 124-VIII» та план заходів із його застосування. Необхідно при сертифікації визначати не тільки параметри безпеки продукції, а також

параметри якості технологічних характеристик зварювального обладнання та параметри якості технологічних процесів зварювання, від яких залежить виготовлення бездефектних зварних конструкцій [9].

При цьому треба враховувати, що в ЄС діє принцип презумпції відповідності (виробник гарантує відповідність зварної конструкції всім параметрам безпеки та вимогам якості згідно НД).

В разі порушення принципу презумпції відповідності виготовленої конструкції на підприємство–виробник накладається штраф до 70 млн евро.

Висновки

Концептуальних змін стандарт ISO 9001:2015 р. щодо чинного стандарту не містить.

Режим переходу до нової версії стандарту встановлено Міжнародним форумом з акредитації (IAF) на протязі трьох років.

Для перепідготовки персоналу з систем управління якістю у державній системі пропонується наступне:

– ввести у курс перепідготовки тему «Порівняльний аналіз діючої версії стандарту ISO 9001 з подальшою версією»;

– розширити тему: «Процесний підхід. Застосування»;

– ввести до плану курсу нову тему «Управління ризиками»;

– розширити тему «Застосування методів моніторингу та вимірювання, в тому числі статистичних методів».

Представлена схема забезпечення виконання безпечних зварних металоконструкцій та аналіз ризику появи дефектів у зварних з'єднаннях на заводах при використанні несертифікованих технологій заповнення балонів захисними газами (вуглекислим газом або сумішшю аргон–вуглекислий газ), та джерел живлення без программ регулювання термічного циклу зварювання.

З метою забезпечення якості зварних металоконструкцій необхідна аттестація технологій зварювання з урахуванням ДСТУ ISO 15610 та ДСТУ ISO 15613 та діючими стандартами відповідності ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ EN 1090.

1. Стандарт ISO DIS 9001:2015.
2. Чайка И. И. Стандарт ISO 9001:2015. Что нас ожидает? / И. И. Чайка // Стандарты и качество. – 2014. – № 6.
3. Хэй Хэмитон Д. М. Шаг вперед с ISO 9001:2015 // Стандарты и качество. – 2014. – № 6.
4. ДСТУ ISO 2553:2014. Зварювання та споріднені процеси. Умовні позначення на кресленнях. Зварні з`єднання.
5. ДСТУ ISO 4063:2014. Зварювання та споріднені процеси. Перелік і умовні позначення процесів.
6. ДСТУ ISO 5817:2014. Зварювання плавленням. Зварні з`єднання із сталі, нікелю, титану та їхніх сплавів (крім електронно-променевого зварювання). Рівні якості залежно від дефектів швів.
7. ДСТУ ISO 6947:2014. Зварювання та споріднені процеси. Робочі положення.
8. ДСТУ ISO 9606:2014. Кваліфікаційні випробування зварників. Зварювання плавленням. Частина 1. Сталі.
9. Потапьевский А. Г. Мониторинг риска образования дефектов сварных соединений при выполнении ремонта и монтажа путем сварки плавящимся электродом в защитных газах / А. Г. Потапьевский, Ю. К. Бондаренко // Матеріали сьомої Міжнародної науково-технічної конференції. – Івано-Франківськ, 2014. – С. 38–42.
10. НПАОП 28.52-1.31-13. Правила охорони праці під час зварювання металів.
11. Бондаренко Ю. К. Проблеми розвитку системи технічного регулювання по НК і ТД зварювальних конструкцій (Огляд) / Ю. К. Бондаренко, К. О. Артюх, Ю. В. Логінова // Материалы 15-го Международного научно-технического семинара «Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте». – Свалява-2015. – С. 213. – 217.
12. Бондаренко Ю. К. Проблеми розвитку системи менеджменту зварювального виробництва конструкцій (Огляд) / Ю. К. Бондаренко, К. О. Артюх, Ю. В. Логінова // Материалы 15-й Международной научно-практической конференции «Качество, стандартизация, контроль, теория и практика». – Одесса, 15.09.2015. – С. 17-22.
13. Потапьевский А. Г. Сварка сталей в защитных газах плавящимся электродом: Техника и технология будущего / А. Г. Потапьевский, Ю. Н. Сараевский, Д. А. Чинахов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 2008 с.

Quality structure of fabrication of welded metal structures on the basis of ISO 9001-2015 standard in comparison with currently valid version ISO 9001-2008 was studied. ISO 9001-2015 version was complemented by the requirements of assessment of the risks of defects initiation in welded joints due to application of uncertified welding consumables and welding power sources without programs of welding mode variation; and ensuring engineering safety at metal structure operation. 13 References, 1 Figure.

Keywords: quality management, welding fabrication, engineering safety, risk assessment

Надійшла до редакції
13.10.2016

23–26 мая **WRTYS 2017 г.** Киев

IX Международная научно-техническая конференция
молодых ученых и специалистов «Сварка и родственные технологии»

Совет научной молодежи ИЭС при поддержке Национальной академии наук Украины и Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины проводит 23–26 мая 2017 г. IX Международную конференцию молодых ученых и специалистов «Сварка и родственные технологии».

www.wrtys.com.ua, E-mail: office@paton.kiev.ua Тел.: +38 (044) 200-47-83, факс: +38 (044) 528-04-86

19-а ВСЕСВІТНЯ КОНФЕРЕНЦІЯ З НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

13–17 червня 2016 р. в Мюнхені відбулась 19-а Всесвітня конференція та виставка з неруйнівного контролю. Такий форум учених, фахівців та підприємців відбувається один раз на чотири роки. Програма конференції, що охоплювала всі види і методи неруйнівного контролю, включала 674 усні та 182 стендові доповіді про найновіші теоретичні та прикладні дослідження, розробки систем, приладів та матеріалів для дефектоскопії. Доповіді презентували представники 41-ї країни світу в 14-ти секціях. Цікава географія та кількість доповідачів. Звичайно ж, найбільшу кількість доповідей представили дослідники Німеччини – 305. Слідом іде велика четвірка: Франція – 71, Китай – 66, Великобританія – 54, США – 43. На наступних місцях: Росія – 28, Японія – 27, Канада – 26, Польща – 21, Україна – 17, Австрія і Південна Корея – по 16, Італія – 15, Індія – 14, Іспанія і Південна Африка – по 11, Нідерланди, Тайвань і Бразилія – по 10. Серед доповідачів були також представники Швейцарії, Бельгії, Литви, Білорусі, Греції, Швеції, Фінляндії, Угорщини, Туреччини, Австралії, Аргентини, Ірану, Малайзії, Болгарії, Чехії, Сінгапуру, Румунії, Португалії, Норвегії, Пакистану, Шрі Ланки та Нігерії.

На перший погляд, Україна в цьому переліку посідає досить високе 10-е місце. Але це заслуга ентузіастів з Києва, Харкова і Львова, які практично не мають підтримки ні Міністерства освіти і науки, ні Національної академії наук, ні навіть своїх інститутів та підприємств. Вважаємо за потрібне назвати українських авторів та назви їх доповідей (підкреслено прізвище доповідача):

1. **Tu.1.I.2.** *V. Uchanin, O. Ostash, J. Golovatiuk, O. Semenets, L. Kovalchuk, G. Lutsenko, A. Opanasenko. Karpenko Physico-Mechanical Institute, Lviv, State enterprise «ANTONOV», Kyiv.* Inspection of the aluminium alloys degradation in aging aircraft components based on eddy current method application.

2. **Tu.2.F.3.** *G. Bezlyudko, V. Nehotyaschy, A. Palienko, R. Solomakha, A. Gopkalo. Special Scientific Engineering, Kharkiv, The E. O. Paton Electric Welding Institute, Kyiv.* Evaluation of the fatigue state of equipment from austenitic stainless steels according to the degree of acquired ferromagnetism and accumulated microdamages by nondestructive method to measure the magnetic characteristic, the coercive force.

3. **Tu.2.F.5. K.** V*akulenko, I. Kozak, G. Bezlyudko, R. Solomakha. Special Scientific Engineering, Kharkiv.* Coercivity of metal as a measure of its damage at micro level in assessing fatigue, as well as in problems of restoration of mechanical properties.

4. **Tu.2.I.3.** *M. Kazakevych, O. Semenets, V. Derecha, V. Kazakevych. KOLORAN, State enterprise «ANTONOV». Kyiv.* Development of leakage control technology of unclosed constructions in aviation.

5. **Tu.3.B.5.** *V. Zakharov, G. Bezlyudko, R. Solomakha, A. Aman. Special Scientific Engineering, Kharkiv.* Monitoring of fatigue and stress-strain state of structures and equipment with new magnetic transducer.

6. **Th.2.E.2.** *V. Ulansky, A.Raza. National Aviation University, Kyiv.* Modelling of condition monitoring with imperfect inspections.

7. **Fr.2.B.3.** *G. Bezlyudko, O. Zavalniuk, V. Nesterenko, R. Solomakha. Special Scientific Engineering, Kharkiv.* Practical system for monitoring current stress and accumulated fatigue of vessel hull using nondestructive method, by measuring magnetic properties of the metal, the coercive force.

8. **P46. G.** *Bezlyudko R. Solomakha, A. Lukina. Special Scientific Engineering, Kharkiv.* Coercimetric technological and acceptance testing of welded joints to ensure their useful life as exemplified by butt welding of rail joints, including subsequent operational diagnostics.

9. **P66. S.** *Mikhailov, V. Troitskiy, R. Pastovensiy, Y. Udovenko. The E. O. Paton Electric Welding Institute, Kyiv.* Highly-sensitive digital Fluoroscopy systems for non-destructive testing.

10. **P67.** *V. Troitskiy, M. Karmanov, S. Mikhailov, R. Pastovensiy. The E. O. Paton Electric Welding Institute, Kyiv.* Experience of tangential radiographic inspection application for nuclear power facilities.

11. **P68.** *V. Troitskiy. The E. O. Paton Electric Welding Institute, Kyiv.* Perspectives of development of radiation testing of welded joints.

12. **P91.** *O. Dugin, Y. Kuts, I. Lysenko, A. Protasov. National Technical University of Ukraine, Kyiv.* Improvement of the eddy current method of nondestructive testing with pulsed mode excitation.

13. **P97.** *V. Troitskiy. The E.O. Paton Electric Welding Institute, Kyiv.* Scanning magnetization devices.

14. **P98. A.** *Opanasenko, A. Iurchenko, G. Lutsenko, V. Uchanin. PROMPRYLAD, Kyiv.* Eddy current multi-channel module for in-line high-speed inspection of railroads rails.

15. **P99.** *V. Uchanin, G. Lutsenko, A. Opanasenko, A. Dzhaganian. PROMPRYLAD, Kyiv.* PROMPRY-

LAD family eddy current detectors – From simple to more complicated.

16. **P172.** *V. Eremenko, I. Lysenko, A. Protasov, E. Suslov. National Technical University of Ukraine, Kyiv.* Using Hilbert transform for signal processing in mechanical impedance analysis.

17. **P179.** *V. Troitskiy, A. Shekero, S. Shchupak. The E. O. Paton Electric Welding Institute, Kyiv.* Improvement of Quality of NDT personnel training: Opinion of Ukrainian Society for NDT.

Конференція та виставка зібрали біля 4000 учасників та відвідувачів. Доповіді заслуховувались одночасно у дев'яти залах. Ще дві зали були віддані стендовим доповідям.

Важливою частиною конференції стала виставка приладів, обладнання і технологій у галузі неруйнівного контролю, на 273-х стендах якої демонструвались найновіші досягнення наших колег з усього світу. Серед фірм-експонентів були три українські підприємства: НВФ «Промприлад», м. Київ, керівник Г. Г. Луценко, ТОВ «Спеціальні Наукові Розробки», м. Харків, керівник Безлюдько Г. Я., ТОВ «Новотест», м. Новомосковськ, керівник Д. В. Моісеєнко.

Крім того, 36 стендів було віддано національним товариствам неруйнівного контролю, серед яких був і стенд Українського товариства неруйнівного контролю і технічної діагностики, голова товариства проф. В. О. Троїцький.

В роботі конференції взяли участь та оглянули виставку біля 30 вчених та спеціалістів з України. Відрадно відмітити той факт, що 15 фахівців приїхали до Мюнхена за фінансової підтримки НВФ «Діагностичні прилади» та НВФ «Ультракон», керівники яких О. В. Павлій та І. В. Павлій. Таке починання заслуговує на високу оцінку і показує приклад одного з напрямків допомоги науковцям з боку бізнесу.

В рамках конференції відбулись засідання Генеральної асамблеї Міжнародного комітету з неруйнівного контролю (IC NDT), Європейської (EF NDT) та Азійсько-Тихоокеанської (APF NDT) федерацій, Комітету із стандартизації (TK/ISO 135).

Наступні міжнародні конференції відбудуться: 12-а Європейська – в Гетеборзі (Швеція) 11–15 червня 2018 р.; 15-а Азійська – в Сінгапурі 13–17 листопада 2017 р. та 20-а Всесвітня – в Сеулі (Південна Корея) 8–12 червня 2020 р.

З більш детальною інформацією про 20-у Всесвітню конференцію з неруйнівного контролю можна ознайомитись у секретаріаті Українського товариства неруйнівного контролю і технічної діагностики (м. Київ, вул. Казимира Малевича, 23, тел. 044-205-22-49) або на сайті конференції www.wcndt2016.com.

Посипайко Ю. М.,
ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАНУ

ПОДПИСКА — 2017
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 (190х190 мм)

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

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

• Вклейка А4 (200х290 мм)

• Разворот А3 (400х290 мм)

• 0,5 А4 (185х130 мм)

• 0,25 А4 (90х130 мм)

• Размер журнала после обрези 200х290 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 котроль)

• 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 3.11.2016. 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.