

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор
Б. Е. ПАТОН

Ученые ИЭС им. Е. О. Патона

к.ф.-м.н. **О. И. Бойчук**, д.т.н. **Э. Ф. Гарф**,
к.т.н. **Е. А. Давыдов**, к.ф.-м.н. **А. Т. Зельниченко**,
д.т.н. **Л. М. Лобанов**,
д.т.н. **А. Я. Недосека** (зам. гл. ред.),
Ю. Н. Посыпайко,
д.т.н. **В. А. Троицкий** (зам. гл. ред.),
к.т.н. **Е. В. Шаповалов**

Ученые институтов и университетов Украины

д.т.н. **В. А. Стрижало**

Ин-т проблем прочности, Киев, Украина

к.х.н. **М. Л. Казакевич**

Ин-т физической химии, Киев, Украина

д.т.н. **О. М. Карпаш**

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

д.ф.-м.н. **З. Т. Назарчук**, к.т.н. **В. Н. Учанин**

Физ.-мех. ин-т, Львов, Украина

д.т.н. **Г. И. Прокопенко**

Ин-т металлофизики, Киев, Украина

д.т.н. **В. А. Стороженко**

Харьков. нац. ун-т радиозлектроники, Украина

д.т.н. **С. К. Фомичов**

НТУУ «Киев. полит. ин-т им. Игоря Сикорского», Киев

д.т.н. **М. Г. Чаусов**

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

Зарубежные ученые

д.т.н. **Н. П. Алешин**

МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, РФ

д.т.н. **В. Л. Венгринович**

Ин-т прикл. физики, Минск, Республика Беларусь

д.т.н. **В. В. Ключев**

ЗАО НИИИИ МНПО «Спектр», Москва, РФ

д.т.н. **В. Е. Щербинин**

ИФМ УрО РАН, Екатеринбург, РФ

Адрес редакции

ИЭС им. Е.О.Патона НАН Украины

ул.Казимира Малевича, 11

г. Киев-150, 03680, Украина

Тел./Факс: (044) 200-82-77, 205-23-90

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com

Редакторы

Л. Н. Герасименко,

Н. А. Прутула (отв. секретарь),

Д. И. Середа, Т. В. Юштина

Свидетельство

о государственной регистрации

КВ4787 от 09.01.2001.

Рекомендовано к печати Ученым советом ИЭС

им. Е. О. Патона НАН Украины

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

СОДЕРЖАНИЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

<i>НЕДОСЕКА А. Я., НЕДОСЕКА С. А.</i> Акустическая эмиссия при растяжении биметаллических образцов	3
<i>КАРПАШ А. М., ТАЦАКОВИЧ Н. Л., КАРПАШ М. О.</i> Усовершенствование метода определения напряженного состояния сосудов, работающих под давлением	9
<i>ТРОИЦКИЙ В. А., МИХАЙЛОВ С. Р., ШИЛО Д. С.</i> Моделирование рентгеновских изображений цифровой рентгенотелевизионной системы на основе скинтилляционного экрана и ПЗС-матрицы.....	17
<i>МАЦЬКО И. Й.</i> Анализ вибрационного сигнала подшипникового узла с развитым дефектом на основании методов статистики периодически коррелированных случайных процессов.....	23
<i>ЗАПОРОЖЕЦ А. А., СВЕРДЛОВА А. Д.</i> Особенности применения SMART GRID в системах мониторинга и диагностирования теплоэнергетических объектов.....	33
<i>РОМАНИШИН Р. И., ИВАНИЦКИЙ Я. Л., КОШЕВОЙ В. В., ШТАЮРА С. Т, РОМАНИШИН И. М., МОКРЫЙ О. М., СЕМАК П. М.</i> Ультразвуковой метод оценки рассеянной поврежденности материала на основе возвратно-рассеянного сигнала	42

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

<i>РАБКИНА М. Д., ПЕРЕПИЧАЙ А. А., ПЕРЕПИЧАЙ И. И., МУТАС В. В.</i> Анализ результатов технического диагностирования кожухотрубных теплообменников для ранжирования эксплуатационных дефектов и оценки их влияния на остаточный ресурс	50
<i>КИСЛИЦЫН В. М., ВОРОНИН С. А.</i> Оценка механических напряжений в металле контактно-резистивным методом.....	55
<i>КРЫЛОВ Э. С., КУЛИШ В. А.</i> Неразрушающий контроль и оценка технического состояния стальных технологических трубопроводов угольных предприятий	58

ИНФОРМАЦИЯ

Отчет правления Украинского общества неразрушающего контроля и технической диагностики (УО НКТД) с 2013 по 2016 гг.....	63
Выставка-конференция «НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ-2017»	67
Особливості обстеження аварійних конструкцій висотних споруд та новітні технічні рішення по їх відновленню при реконструкції.....	69

ИЗДАНИЕ ПОДДЕРЖИВАЮТ:

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

Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики

ТЕХНІЧНА ДІАГНОСТИКА і НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ

TEKHNICHESKAYA DIAGNOSTIKA і NERAZRUSHAYUSHCHIY KONTROL

Виходить 4 рази на рік

Quarterly issue

Головний редактор Б. Є. Патон

Editor-in-Chief B. E. Paton

ЗМІСТ

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

- НЕДОСЕКА А. Я., НЕДОСЕКА С. А.* Акустична емісія при розтягуванні біметалевих зразків 3
- КАРПАШ А. М., ТАЦАКОВИЧ Н. Л., КАРПАШ М. О.* Удосконалення методу визначення напруженого стану посудин, що працюють під тиском 9
- ТРОЙЦЬКИЙ В. О., МИХАЙЛОВ С. Р., ШИЛО Д. С.* Моделювання рентгенівських зображень цифрової рентгенотелевізійної системи на основі сцинтиляційного екрану та ПЗС-матриці 17
- МАЦЬКО І. Й.* Аналіз вібраційного сигналу підшипникового вузла з розвинутим дефектом на основі методів статистики періодично корельованих випадкових процесів 23
- ЗАПОРОЖЕЦЬ А. О., СВЕРДЛОВА А. Д.* Особливості застосування технології SMART GRID в системах моніторингу та діагностування теплоенергетичних об'єктів 33
- РОМАНИШИН Р. І., ІВАНИЦЬКИЙ Я. Л., КОШОВИЙ В. В., ШТАЮРА С. Т., РОМАНИШИН І. М., МОКРИЙ О. М., СЕМАК П. М.* Ультразвуковий метод оцінювання розсіяної пошкодженості матеріалу на основі зворотно-розсіяного сигналу 42

ВИРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ

- РАБКІНА М. Д., ПЕРЕПІЧАЙ А. О., ПЕРЕПІЧАЙ І. І., МУТАС В. В.* Аналіз результатів технічного діагностування кожухотрубних теплообмінників для ранжирування експлуатаційних дефектів та оцінки їх впливу на залишковий ресурс 50
- КІСЛИЦІН В. М., ВОРОНІН С. О.* Оцінка механічної напруги в металі контактено-резистивним методом 55
- КРИЛОВ Е. С., КУЛІШ В. А.* Неруйнівний контроль і оцінка технічного стану сталевих технологічних трубопроводів вугільних підприємств 58

ІНФОРМАЦІЯ

- Звіт правління Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики (УТ НКТД) з 2013 по 2016 рр. 63
- Виставка-конференція «НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ-2017» 67
- Особливості обстеження аварійних конструкцій висотних споруд та новітні технічні рішення по їх відновленню при реконструкції 69

Адреса редакції

03680, Україна, м. Київ-150, вул.Казимира Малевича, 11
ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України
Тел./Факс: (044) 200-82-77, 205-23-90
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com

CONTENTS

SCIENTIFIC-TECHNICAL

- NEDOSEKA A. YA., NEDOSEKA S. A.* Acoustic emission in tension of bimetal specimens 3
- KARPASH A. M., TATSAKOVICH N. L., KARPASH M. O.* Improvement of method for determination of stressed state of pressurized pipelines and vessels 9
- TROITSKII V. A., MIKHAYLOV S. R., SHYLO D. S.* Modelling of X-ray images of digital X-ray-TV system based on scintillation screen and CCD matrix 17
- MATSKO I. Y.* Analysis of vibration signal of bearing unit with developed defect based on methods of statistics of periodically correlated random processes... 23
- ZAPOROZHETS A. A., SVERDLOVA A. D.* Peculiarities of application of Smart Grid technology in systems for monitoring and diagnostics of heat-and-power engineering objects 33
- ROMANISHIN R. I., IVANITSKII Ya. L., KOSHOVYI V. V., SHTAYURA S. T., ROMANISHIN I. M., MOKRIY O. M., SEMAK P. M.* Ultrasonic method of evaluation of diffused material damage based on back-scattered signal 42

INDUSTRIAL

- RABKINA M. D., PEREPICHAY A. A., PEREPICHAY I. I., MUTAS V. V.* Analysis of results of technical diagnostics of shell-and-tube heat exchangers for ranking of service defects and evaluation of their effect on residual life 50
- KISLITSYN V. M., VORONIN S. A.* Evaluation of mechanical stresses in metal using contact resistance method 55
- KRYLOV E. S., KULISH V. A.* Non-destructive testing and evaluation of technical state of steel technological pipelines of coal enterprises 58

INFORMATION

- Report of the management of Ukrainian Society for Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics (US NDTTD) from 2013 to 2016 63
- Exhibition-Conference «NON-DESTRUCTIVE TESTING-2017» 67
- Peculiarities of examination of dangerous structures of high-rise buildings and novel engineering solutions on their repair at reconstruction 69

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

АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ

А. Я. НЕДОСЕКА, С. А. НЕДОСЕКА

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

В статье рассмотрены особенности формирования событий акустической эмиссии в биметаллах при их деформировании. Результаты получены при растяжении образцов, сваренных из стали 25Х1МФ и манурита (36ХМ). Соединение двух материалов с различными свойствами в испытываемых образцах осуществлялось сваркой в средней их части. В результате испытаний было установлено, что при протяженности привариваемого материала более 0,2 мм наличие границы раздела свойств приводит только к уменьшению амплитуды распространяющихся в материалах волн и не влияет на локацию координат сигналов акустической эмиссии на выбранной базе измерений. В процессе испытаний образца из биметалла на растяжение, вплоть до разрушения, установлено, что технология испытаний, основанная на акустической эмиссии, может быть распространена на испытания разнородных материалов и позволяет отслеживать всю кинетику возникновения и развития повреждений в материале при его деформировании. Библиогр. 11, табл. 1, рис. 5.

Ключевые слова: биметаллы, сварной образец, акустическая эмиссия, стержень, расчет, волна, испытание

В промышленности достаточно широко используются разнородные материалы, позволяющие оптимизировать эксплуатационные свойства конструкций. Соединение этих материалов между собой производится, как правило, путем сварки. Как известно, сварка вносит определенные изменения в структуру металла сварного соединения и околошовной зоны. Образуется переходная структура, обладающая промежуточными свойствами. В настоящей работе в качестве примера рассмотрены материалы, используемые в конструкциях, работающих при высоких температурах – соединение манурита типа 36ХМ и стали 25Х1МФ. Химический состав манурита типа 36ХМ, мас. %: 0,4...0,45 С; равно или менее 0,3 S; равно или менее 0,3 Р; 23...27 Cr; 32...35 Ni; равно или менее 2,0 Si; равно или менее 1,5 Mn; равно или менее 1,0 Nb; равно или менее 0,5 Mo; равно или менее 0,25 Cu. Внизу в таблице представлены основные свойства этих материалов.

Как видно из таблиц, свойства двух исследуемых материалов существенно отличаются. В частности, предел текучести у стали 25Х1МФ многократно выше. Очевидно, и затраты энергии, необходимой для движения волны акустической

эмиссии (АЭ) по этим материалам, могут также существенно отличаться.

Рассмотрим аналитически распространение акустических волн в образце, изготовленном из этих материалов и сваренном в его средней части (рис. 1, 2). Диаметр образца 16, длина 200 мм.

В средней части образца выполнено утонение до 9 мм и две прямоугольные выборки на глубину по 2 мм. Утонение и выборки были сделаны для сосредоточения деформаций, возникающих при растяжении образца в зоне сварного соединения.

Образцы, показанные на рис. 2, были изготовлены в соответствии с рис. 1 и растягивались в разрывной машине Р-20 до разрушения. При этом фиксировались события акустической эмиссии, возникающие последовательно по мере увеличения растягивающей нагрузки. На фотографиях образцов хорошо видны конструкция, форма и размеры сварного шва.

После выполнения аналитического расчета распространения волн АЭ в биметаллическом стержне приведем и реальную картину распределения АЭ событий для образца (рис. 1, д), испытанного при температуре 914 °С.

При расчете будет рассмотрен образец-стержень длиной 20 см, в средней части которого на расстоянии z_r от начала координат имеется свар-

Основные свойства стали 25Х1МФ и манурита типа 36ХМ при 20 °С

Состояние поставки, режим термообработки	Диаметр, мм	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ_5 , %	ψ , %
Сталь 25Х1МФ					
Прутки:					
Закалка 880...900 °С, масло, отпуск 640...660 °С, воздух.	90	735	880	14	50
Закалка 930...950 °С, масло, отпуск 620...660 °С, воздух.	90	665	780	16	50
Нормализация 1000 °С, отпуск 650 °С	90	810...870	940...980	17	51...58
Манурит типа 36ХМ					
Прутки (продольное направление проката)	90	250	450	40	60

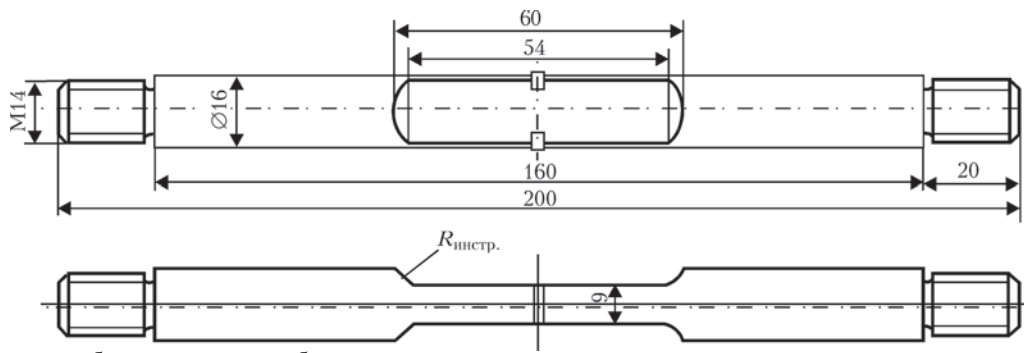


Рис. 1. Конструкция биметаллического образца

ное соединение двух отличающихся по свойствам материалов. Если обозначить коэффициент торможения сигнала АЭ в материале в зоне сварного соединения буквой β (с/см²) и отнести его к узкой приведенной плоскости с координатой z_r , то дифференциальное уравнение задачи можно записать в виде¹:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} - \frac{1}{C_1^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - \beta \delta(z - z_r) \frac{\partial \varphi}{\partial t} = -\frac{1+\nu}{1-\nu} u_0^* \delta(t) \delta(z - z_{in}) \quad (1)$$

Здесь: φ – функция перемещения, см²; u_0^* – импульс локального начального перемещения, вызванный изменением структуры растягиваемого материала в месте с мгновенной координатой z_{in} , см; ν – коэффициент Пуассона; z – координата вдоль оси стержня, см; t – время, с.

Решение представленного дифференциального уравнения будем искать методом интегральных преобразований [1–11]. По мере деформирования в любом месте по длине стержня могут возникнуть сигналы АЭ с координатой z_{in} . Сосредоточенность мест возникновения сигнала АЭ определим дельта-функцией Дирака. Сосредоточенность изменения свойств материала стержня будет характеризовать также дельта-функция по координате z_r . Растягиваемый стержень имеет свободные от напряжений границы при $z = 0$ и $z = 20$ см. В этом случае функция $\frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0$.

Для решения данной задачи с заданными граничными и начальными условиями воспользуемся конечным синус-преобразованием Фурье по координате z и преобразованием Лапласа по времени t [2, 5]. В этом случае после выполнения преобразований уравнение (1) примет вид:

$$\left(\omega_n^2 + \frac{p^2}{C_1^2} \right) \overline{\overline{\varphi}} + p \beta \overline{\overline{\varphi}}_r \sin(\omega_n z_r) = \frac{1+\nu}{1-\nu} u_0^* \sin(\omega_n z_{in}),$$

где p и ω_n – параметры преобразований Лапласа и Фурье. Черта над символом показывает на выполнение преобразования Лапласа над этой функцией на границе z_r .

Тогда решение дифференциального уравнения (1) для перемещения u после выполнения обратных преобразований будет иметь вид:

$$u = \frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{2u_0^* C_1}{a} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\omega_n \cos(\omega_n z) \sin(\omega_n z_{in})}{\sqrt{\omega_n^2 - \frac{\beta^2 C_1^2 \sin^4(\omega_n z_r)}{a^2}}} \times \exp\left(-\frac{\beta C_1^2 \sin^2(\omega_n z_r)}{a}\right) \sin\left[C_1 t \sqrt{\omega_n^2 - \frac{\beta^2 C_1^2 \sin^4(\omega_n z_r)}{a^2}}\right],$$

если подкоренное выражение положительно и

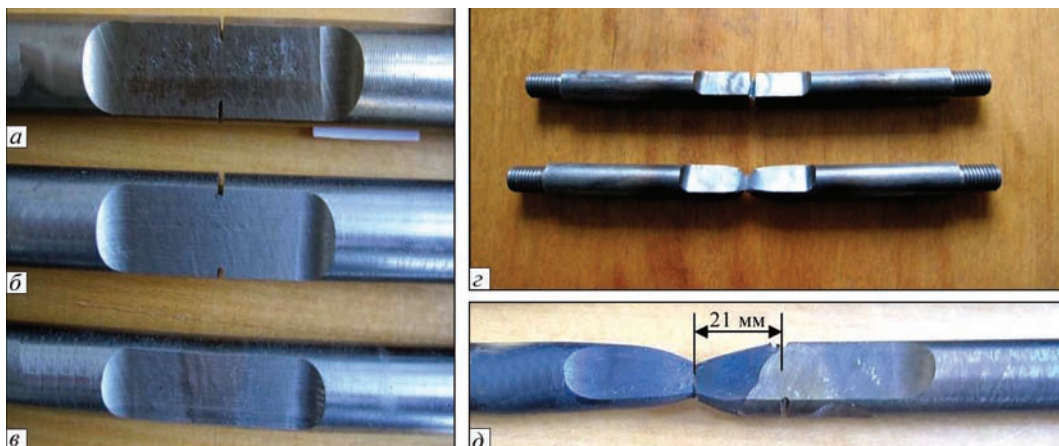


Рис. 2. Образцы с концентратором для испытаний на растяжение в исходном состоянии: а – цельный – манурит; б – цельный – сталь 25Х1МФ; в – составной – манурит (правая часть), сталь 25Х1МФ (левая) и после испытаний: г – при температуре 560 °С; д – при температуре 914 °С

¹ Решение для любой другой ширины области сопротивления можно получить путем интегрирования решения (2) по координате z_r .

$$u = \frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{2u_0^* C_1}{a} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\omega_n \cos(\omega_n z) \sin(\omega_n z_i)}{\sqrt{\omega_n^2 - \frac{\beta^2 C_1^2 \sin^4(\omega_n z_r)}{a^2}}} \times \exp\left(-\frac{\beta C_1^2 \sin^2(\omega_n z_r)}{a}\right) \operatorname{sh}\left[C_1 t \sqrt{\omega_n^2 - \frac{\beta^2 C_1^2 \sin^4(\omega_n z_r)}{a^2}}\right] \quad (2)$$

если подкоренное выражение отрицательное. В обоих случаях спектральным уравнением будет: $\sin(\omega_n a) = 0$

В случае отсутствия барьера сопротивления распространению АЭ волн, выражение для u существенно упростится и примет вид:

$$u = \frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{2u_0^* C_1}{a} \sum_{n=1}^{\infty} \cos(\omega_n z) \sin(\omega_n z_i) \sin[\omega_n C_1 t].$$

Учитывая, что конструкция реального образца предусматривает сосредоточение деформаций, а, следовательно, и источников АЭ, то, располагая теоретический источник волны в районе концентратора, получим подобную реальной картину распределения АЭ в образце. Так, на рис. 3 представлены графики зависимости координат распро-

страняющейся АЭ волны в разные стороны от места возникновения возмущения для случаев, когда $\beta = 0$, $\beta = 1$ и $\beta = 110$ с/см². Представлены данные для однородного образца и образца с тонким слоем сопротивления.

Как видим, при наличии достаточно высокого сопротивления области раздела двух соединенных между собой материалов в образце возникают отраженные волны, которые могут существенно исказить картину при локации координат АЭ. Амплитуда отраженных волн зависит от величины коэффициента β . Чем больше значение этого коэффициента, тем выше амплитуда отраженных сигналов, и тем ниже на ту же величину амплитуда основного сигнала. Однако, как показали расчеты, глубина такой области невелика, и ощутимые результаты влияния образуются при ее протяженности до 0,2 мм и менее. Это, как правило, может быть связано с различными прослойками и вставками из других материалов. Наличие протяженной области сопротивления нивелирует общую картину за счет появления второй поверхности отражения, и суммарный сигнал всех отраженных волн равен нулю. В то же время, наличие протяженной области сопротивления приводит, как показывают расчеты, к достаточно ощутимому, в зависи-

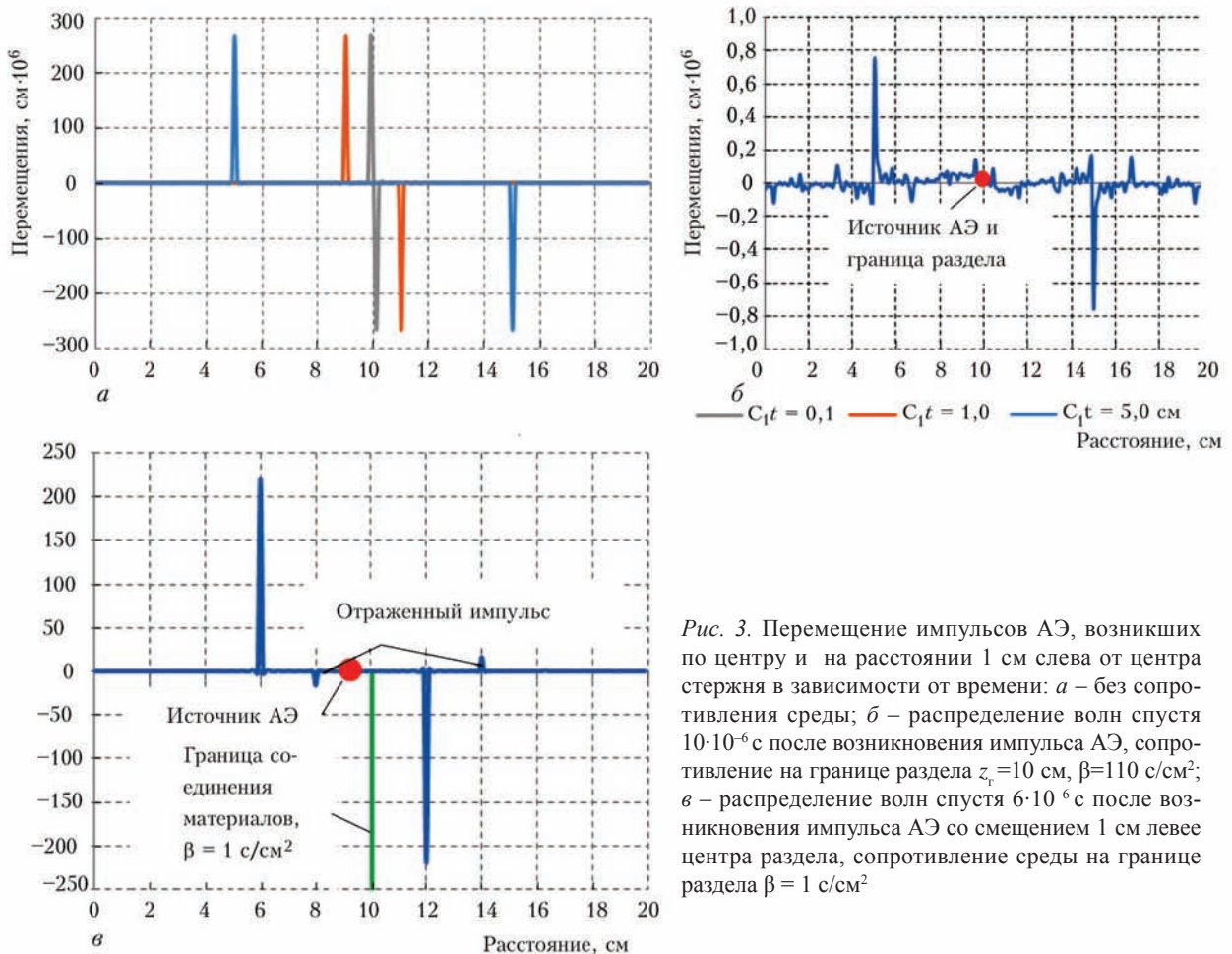


Рис. 3. Перемещение импульсов АЭ, возникших по центру и на расстоянии 1 см слева от центра стержня в зависимости от времени: a – без сопротивления среды; b – распределение волн спустя $10 \cdot 10^{-6}$ с после возникновения импульса АЭ, сопротивление на границе раздела $z_r = 10$ см, $\beta = 110$ с/см²; v – распределение волн спустя $6 \cdot 10^{-6}$ с после возникновения импульса АЭ со смещением 1 см левее центра раздела, сопротивление среды на границе раздела $\beta = 1$ с/см²

мости от коэффициента β , снижению амплитуды распространяющейся волны.

При переходе к анализу результатов реальных испытаний биметаллических образцов следует отметить, прежде всего, одну интересную особенность в распределении координат событий АЭ. Определение координаты события АЭ, возникшего в образце, происходит расчетным путем и существенно зависит от скорости распространения волн АЭ в металле. Табличная скорость для рассматриваемых материалов составляет $0,5 \cdot 10^6$ см/с. В то же время определение реальной, фактической скорости распространения волны АЭ в образце предварительным его прозвучиванием специальными имитаторами АЭ показывает более низкие значения. Скорее всего это связано с точечным, происходящим не по всей площади поперечного сечения образца, действием источника АЭ и, возникающими в связи с этим, переотражениями движущейся волны от стенок образца. Таким образом, суммарная скорость становится ниже табличной. В расчетной формуле при определении координат АЭ используется уже не табличная, а полученная путем «прозвучивания»

образцов реальная скорость распространения АЭ волны в материале. В рассматриваемой серии испытаний такая скорость составила $0,15 \cdot 10^6$ см/с. Вполне удовлетворительные результаты одного из испытаний приведены на рис. 4, 5.

На рис. 4 представлена картина распределения событий АЭ по длине образца (штриховые линии в нижней части рисунка), возникших при испытании биметалла при температуре 914°C с использованием аппаратуры ЕМА 3.9 (образец показан на рис. 1, д). В процессе испытания наблюдалось, как вплоть до разрушения образца возникают и накапливаются повреждения структуры материалов с ростом растягивающего усилия. Рис. 5 отображает кинетику этого процесса во времени. Таким образом, можно судить о всей картине изменений в структуре материалов в процессе их деформирования [10, 11]. В верхней части рис. 4 представлены суммарно все события, возникшие в образце от начала и до конца испытаний (разрушения образца). Координата образовавшегося кластера указывает место разрушения. Флажок в верхней части кластера показывает число возникших АЭ событий, в данном случае 143. Наиболь-

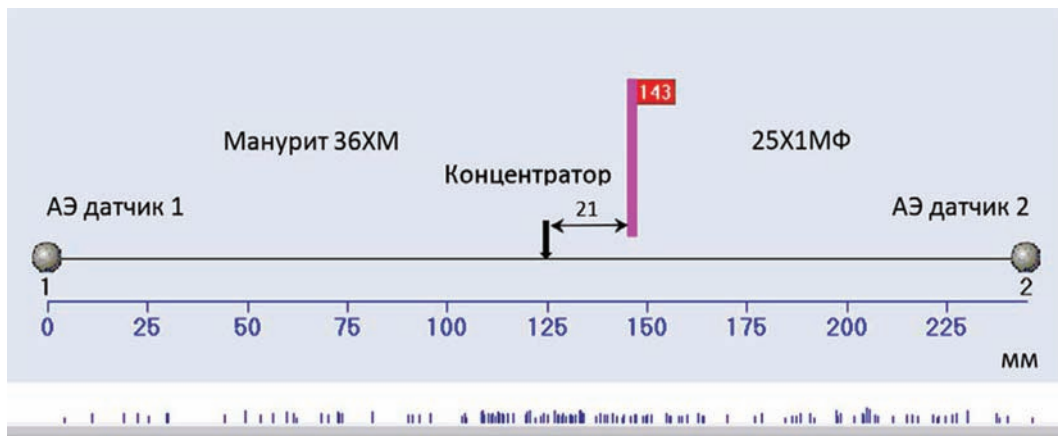


Рис. 4. Распределение АЭ событий вдоль растягиваемого биметаллического образца (манурит+сталь 25Х1МФ). Образец показан на рис. 2, в, д

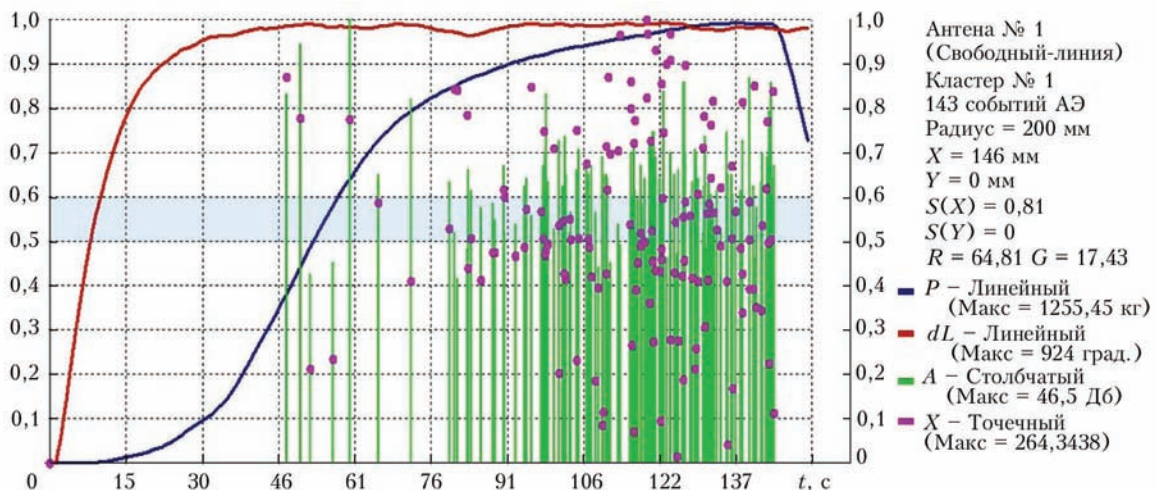


Рис. 5. График развития процесса разрушения и связанной с ним АЭ. Голубая прозрачная полоса выделяет область координат, где произошло разрушение, для более четкой демонстрации кинетики развития деструктивных процессов

шее число событий АЭ сосредоточено на участке из стали 25Х1МФ. По этому материалу и произошло разрушение на расстоянии 21 мм от концентратора, изготовленного в сварном шве.

На рис. 5 красная кривая показывает удлинение образца при нагружении, синяя – растущую нагрузку. Зеленые вертикальные линии показывают амплитуды АЭ импульсов, возникших в каждый конкретный момент времени, точки на линиях показывают координату каждого АЭ события в соответствующий момент времени.

В заключение можно отметить, что выполненные исследования показывают принципиальную возможность испытания биметаллических образцов с применением разработанной АЭ технологии.

На основании полученных результатов при планировании и выполнении дальнейших испытаний образцов с применением АЭ технологии необходимо учитывать следующее:

1. Наличие в образце тонкого поперечного слоя с повышенным сопротивлением приводит к образованию зеркально отраженной от его границы волны.
2. Наличие протяженной области повышенного сопротивления приводит к нивелированию - взаимному компенсированию отраженных волн по всей длине области.
3. Появление отраженной волны снижает амплитуду основной волны, однако амплитуда суммарной волны остается прежней.
4. Реальная скорость распространения волн АЭ в образцах отличается от табличной скорости в материале и при этом всегда меньше нее.

Выводы

Выполнен теоретический расчет распространения волн АЭ в биметаллических стержневых образцах, в том числе при наличии дополнительного слоя повышенного сопротивления различной толщины. Установлено, при каких условиях слой сопротивления оказывает влияние на определение координат событий АЭ.

Показано, что при распространении АЭ волны наличие сварного соединения разнородных материалов с близкими физическими свойствами сказывается в обоих материалах только на уменьшении амплитуды сигналов.

Экспериментально подтверждена принципиальная возможность использования АЭ технологии при испытании биметаллических материалов, в том числе при высоких температурах, для отслеживания изменений их структуры на протяжении всего процесса деформирования вплоть до разрушения.

Список литературы

1. Двайт Г. Б. (1966) *Таблицы интегралов и другие математические формулы*. Москва, Наука.

2. Деч Г. (1971) *Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и Z преобразования*. Москва, Наука.
3. Недосека А. Я. (2008) *Основы расчета и диагностики сварных конструкций*. Б. Е. Патон (ред). Киев, Индпром.
4. Тимошенко С. П. (1967) *Колесания в инженерном деле*. Москва, Наука.
5. Трантер К. Дж. (1956) *Интегральные преобразования в математической физике*. Москва, Гостехиздат.
6. Назарчук З. Т. (ред). (2001) *Механіка руйнування та міцність матеріалів*. Т. 5, Львів, ФМІ.
7. Недосека С. А., Недосека А. Я. (2010) Комплексная оценка поврежденности и остаточного ресурса металлов с эксплуатационной наработкой. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 1, 9–16.
8. Недосека А. Я., Недосека С. А., Бойчук О. И. (2013) Влияние локального скопления дефектов на распространение волн акустической эмиссии. Сообщение 2. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 2, 9–14.
9. Недосека А. Я., Недосека С. А., Овсиенко М. А. (2011) Влияние методов обработки акустико-эмиссионной информации на формирование АЭ событий и определение их координат. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 2, 5–14.
10. Недосека А. Я., Недосека С. А., Маркашова Л. И., Кушнарева О. С. (2016) О распознавании изменений структуры материалов при разрушении по данным акустической эмиссии. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 4, 9–13.
11. Недосека А. Я., Недосека С. А. (2014) Некоторые особенности применения метода акустической эмиссии при контроле разрушения материалов. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 2, 3–11.

References

1. Dvayt G. B. (1966) *Tablitsy integralov i drugie matematicheskiye formuly*. Moskva, Nauka. [in Russian]
2. Dech. G. (1971) *Rukovodstvo k prakticheskomu primeneniyu preobrazovaniya Laplasa i Z preobrazovaniya*. Moskva, Nauka. [in Russian]
3. Nedoseka A. Ya. (2008) *Osnovy rascheta i diagnostiki svarnykh konstruksiy*. B. Ye. Paton (red). Kiyev, Indprom. [in Russian]
4. Timoshenko S. P. (1967) *Kolebaniya v inzhenernom dele*. Moskva, Nauka. [in Russian]
5. Tranter K. Dzh. (1956) *Integralnye preobrazovaniya v matematicheskoy fizike*. Moskva, Gostekhizdat. [in Russian]
6. Nazarchuk Z. T. (red). (2001) *Mekhanika ruinuvannia ta mitsnist materialiv*. T. 5, Lviv, FMI. [in Ukrainian]
7. Nedoseka S. A., Nedoseka A. Ya. (2010) Integrated assessment of damage level and residual life of metals with certain operating life. *Tekhnicheskaya Diagnostika i Nerazrushayushchiy Kontrol*, 1, 9–16. [in Russian]
8. Nedoseka A. Ya., Nedoseka S. A., Boychuk O. I. (2013) Influence of local accumulation of defects on propagation of acoustic emission waves. Information 2. *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchy kontrol*, 2, 9–14. [in Russian]
9. Nedoseka A. Ya., Nedoseka S. A., Ovsienko M. A. (2011) Influence of methods of acoustic-emission data treatment on formation of AE events and determination of their coordinates. *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchy kontrol*, 2, 5–14. [in Russian]
10. Nedoseka A. Ya., Nedoseka S. A., Markashova L. I., Kushnareva O. S. (2016) On identification of structural changes in materials at fracture by acoustic emission data. *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchy kontrol*, 4, 9–13. [in Russian]
11. Nedoseka A. Ya., Nedoseka S. A. (2014) Features of application of acoustic emission method at destructive testing of materials. *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchy kontrol*, 2, 3–11. [in Russian]

А. Я. НЕДОСЕКА, С. А. НЕДОСЕКА

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

АКУСТИЧНА ЕМІСІЯ ПРИ РОЗТЯГУВАННІ
БІМЕТАЛЕВИХ ЗРАЗКІВ

У статті розглянуто особливості формування подій акустичної емісії в біметалах при їх деформації. Результати отримані при розтягуванні зразків, зварених зі сталі 25Х1МФ і мануріта (36Х). З'єднання двох матеріалів з різними властивостями в досліджуваних зразках здійснювалося зварюванням в середній їх частині. В результаті випробувань було встановлено, що при протяжності приварюваного матеріалу більше 0,2 мм наявність кордону розділу властивостей призводить тільки до зменшення амплітуди хвиль, що поширюються в матеріалах і не впливає на локацію координат сигналів акустичної емісії на обраній базі вимірів. В процесі випробувань зразків з біметалу на розтягнення, аж до руйнування, встановлено, що технологія випробувань, заснована на акустичній емісії, може бути поширена на випробування різнорідних матеріалів і дозволяє відстежувати всю кінетику виникнення і розвитку пошкоджень в матеріалі при його деформації. Бібліогр. 11, табл. 1, рис. 5.

Ключові слова: біметали, зварений зразок, акустична емісія, стрижень, розрахунок, хвиля, випробування

A. YA. NEDOSEKA, S. A. NEDOSEKA

E. O. Paton Electric Welding Institute of the NASU
11 Kazimir Malevich str., Kyiv-150, E-mail: office@paton.kiev.ua

ACOUSTIC EMISSION IN TENSION
OF BIMETAL SPECIMENS

The paper considers the peculiarities of formation of acoustic emission events in bimetal at their deformation. The results were obtained in tension of the specimens made of steel 25Kh1MF and manurite (36XM). Joining of two materials with different properties in tested specimens was carried out by welding in their average part. The results of tests showed that presence of a boundary of properties division at welded-up material extension more than 0.2 mm leads only to reduction of amplitude of waves propagating in the material and does not effect location of coordinates of acoustic emission signals for selected measurement base. The process of tensile testing of bimetal specimen up to fracture revealed that testing technology based on acoustic emission can be used for dissimilar materials testing and allows tracing whole kinetics of nucleation and propagation of damages in material at its deformation. Ref. 11, Table 1, Figures 5.

Keywords: bimetal, welded specimen, acoustic emission, rod, calculation, wave, testing

Поступила в редакцію
13.02.2014

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАННЯ ім. Є. О. ПАТОНА НАНУ
МІЖНАРОДНА АСОЦІАЦІЯ «ЗВАРЮВАННЯ»**



**Міжнародна конференція
ЗВАРЮВАННЯ ТА СПОРІДНЕНІ ТЕХНОЛОГІЇ – СЬОГОДЕННЯ І МАЙБУТНЄ**

**Присвячується 100-річчю
Національної академії наук України**

5 – 6 грудня, 2018 р.
Україна, м. Київ

Голова:
академік НАН України Л. Лобанов

НАУКОВІ НАПРЯМКИ КОНФЕРЕНЦІЇ

- Технології, матеріали і обладнання для зварювання і споріднених процесів
- Міцність зварних конструкцій, теоретичні та експериментальні дослідження напружено-деформуючих станів та їх регулювання
- Вдосконалення зварних конструкцій, автоматизація їх розрахунку і проектування, оцінка і подовження ресурсу
- Нові конструкційні матеріали
- Неруйнівний контроль і технічна діагностика
- Інженерія поверхні
- Зварювання в медицині – технології, обладнання; наноматеріали і нанотехнології
- Проблеми екології зварювального виробництва
- Спеціальна електрометалургія
- Стандартизація, сертифікація продукції зварювального виробництва, підготовка і атестація спеціалістів

Відправлення тез доповідей для участі в роботі конференції – до 01.11.2017 р.

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України,
вул. Казимира Малевича (Боженка), 11, м. Київ, 03680
тел.: (38044) 200-60-16; 200-47-57; факс: (38044) 528-04-86
E-mail: office@paton.kiev.ua
www.paton.kiev.ua | www.patonpublishinghouse.com

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ТРУБОПРОВОДІВ ТА ПОСУДИН, ЩО ПРАЦЮЮТЬ ПІД ТИСКОМ

А. М. КАРПАШ¹, Н. Л. ТАЦАКОВИЧ², М. О. КАРПАШ¹

¹ТзОВ «Науково-виробнича фірма «Зонд». 76002, м. Івано-Франківськ, вул. Микитинецька, 5а.

E-mail: zond.ndt@gmail.com

²Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

E-mail: mkarpash@nung.edu.ua

Досліджувалась можливість використання результатів вимірювання засобами неруйнівного контролю структурно-чутливих характеристик (коефіцієнт теплопровідності, питома електропровідність, ударна в'язкість, твердість) для визначення місця і рівня напружень у матеріалі металоконструкцій довготривалої експлуатації. Проведено серію експериментальних досліджень на спеціально виготовлених дослідних зразках у вигляді масштабованих посудин, що працюють під тиском. Враховуючи суттєву нелінійність й різну точність і достовірність вимірюваних інформативних параметрів було прийнято рішення застосувати алгоритми штучних нейронних мереж для опрацювання масиви експериментальних даних. За результатами проведених досліджень доведено можливість визначення напружень у стінках посудин за трьома інформативними параметрами: твердість, питомий електричний опір, коефіцієнт корозійної сили й одержано аналітичну залежність матричного рівняння для визначення рівня напружень у матеріалах металоконструкцій. *Бібліогр.* 15, *табл.* 5, *рис.* 3.

Ключові слова: напруження, інформативні параметри, багатопараметрова діагностика, алгоритми штучних нейронних мереж

Забезпечення експлуатаційної надійності устаткування та металоконструкцій з тривалим терміном експлуатації є важливим та актуальним завданням, зокрема для об'єктів нафтогазового комплексу держави – основні фонди у ньому понад 70 % відпрацювали свій ресурс чи близькі до його вичерпання [1]. Одним із найефективніших методів попередження відмов згаданих об'єктів є його періодичний контроль методами та засобами технічної діагностики та неруйнівного контролю [2]. Проте, зважаючи на той факт, що значна частина обладнання в нафтогазовому комплексі експлуатується в екстремальних умовах (значні знакозмінні навантаження, температурні коливання, вплив корозійних чинників тощо) ймовірність виникнення та швидкість росту дефектів типу тріщини в багатьох випадках не відповідає загальноприйнятим підходам [3].

Тому перед дослідниками постає завдання пошуку нових підходів як до виявлення вже наявних дефектів, так і до визначення місць їх потенційного зародження, а саме величини та рівня напружень, що виникають в металоконструкціях довготривалої експлуатації. Типово місця виникнення напружень у технологічному устаткуванні визначають аналітичними методами або завдяки виробничому досвіду персоналу, який його обслуговує [4]. Основними методами вимірювання напружень у матеріалі є тензометричний [5], метод магнітної пам'яті [6], магнітний через вимірювання

коерцитивної сили [7]. Також було встановлено, що тільки деякі з небагатьох інформативних параметрів, які можна вимірювати засобами неруйнівного контролю, є чутливими до зміни структури матеріалу, а також рівня напружень у матеріалі металоконструкції – йдеться про коефіцієнт теплопровідності, питомий електричний опір, ударну в'язкість і твердість [8]. Тому було поставлено завдання дослідити можливість використання згаданих вище параметрів для оцінки рівня напружень у матеріалі металоконструкцій. З цією метою було проведено серію експериментальних досліджень на спеціально створених дослідних зразках у вигляді масштабованих посудин, що працюють під тиском [9]. При цьому зауважимо, що тут і далі йтиметься про нормальні напруження, що виникають в стінці обичайки посудини під тиском, або трубопроводу. На модельні посудини ступенево подавалося навантаження до досягнення границі витривалості і виконувалось вимірювання низки параметрів: твердості, коерцитивної сили, питомого електричного опору та спеціального магнітного параметра. У результаті проведення двох серій експериментів одержано чотири масиви вимірюваних даних [10].

Головним завданням експериментів було змоделювати та виготовити дослідні зразки у вигляді посудин, що працюють під тиском, провести випробування цих зразків за попередньо складеним алгоритмом збільшення навантаження та отримати

мати необхідний комплекс структурно-чутливих інформативних параметрів, за яким можна характеризувати та визначати напружений стан металевих конструкцій.

Після виготовлення експериментальні зразки були перевірені розрахунком на міцність, регламентованим у роботах [11, 12], та за допомогою програми Solidworks 2014 SPO [13]. Результати розрахунку за трьома методиками приблизно співпали і знаходилися у межах 253...273 МПа [9]. Отримані результати дали змогу розробити схеми проведення вимірювання інформативних параметрів та покрокового алгоритму зміни прикладеного навантаження. До даного комплексу інформативних параметрів входять виміряні значення твердості матеріалу (H_b), коерцитивної сили (H_c), магнітного параметру (I_2), питомого електричного опору (ρ) та контроль геометричних параметрів експериментальних зразків.

Під час кожного поступового підняття тиску (1 цикл підняття тиску рівний 1 МПа) були проведені вимірювання засобами та приладами, які представляли окремі методи неруйнівного контролю, з метою отримання інформативних параметрів, які є чутливими до змін у структурі металу і за допомогою яких можна охарактеризувати рівень напружень у відповідальних елементах металоконструкції.

Результати графічного та кореляційного аналізу отриманих результатів двох експериментальних посудин вказали на нелінійність зв'язку рівня напружень із досліджуваними параметрами, а також можливість нелінійних кореляцій між самими інформативними параметрами.

Враховуючи суттєву нелінійність зв'язків виміряних інформативних параметрів із значеннями прикладених навантажень (напружень), що значно різняться між собою за повторюваністю, точністю й достовірністю і можуть бути взаємнокор-

рельованими, було вирішено використати успішно апробовану методологію багатопараметрової діагностики з використанням алгоритмів штучних нейронних мереж [14].

Метою використання алгоритмів штучних нейронних мереж є одночасне врахування кількох експериментально одержаних параметрів, що дає можливість оцінити напружений стан посудин, які працюють під тиском, комплексним способом, а також встановити між інформативними параметрами та напруженнями аналітичний зв'язок. Додатковим завданням досліджень слугувало встановлення оптимального набору інформативних параметрів для найбільш точного визначення напружень за мінімальною кількістю самих параметрів.

Робота із нейронними мережами передбачає наступні етапи: підготовка даних, формування та тренування нейронної мережі, тестування та перевірка на інших невідомих даних.

Перший етап містить у собі підготовку даних для подальшої роботи в нейронній мережі, тобто включає процеси опрацювання та набору даних з одержаних експериментальних результатів. Окрім того виконується нормування даних з метою зведення їх до діапазону значень [0-1].

Другий етап роботи з нейронною мережею полягає у формуванні і тренуванні навчальних пар. У нашому випадку були сформовані навчальні пари з трьох (H_b_1, H_c_1, ρ_1) та чотирьох ($H_b_1, H_c_1, \rho_1, I_2_1$) інформативних параметрів із відповідними розрахунковими значеннями напружень (σ_p) (табл. 1). Виміряні значення, які формують навчальні пари для тренування, бралися із першої зони (1-го перерізу) експериментальної посудини № 1.

Наведені вище максимально спостережні значення по кожному вимірюваному параметру були зведені до діапазону від 0 до 1.

Таблиця 1. Результати вимірювань, які формують навчальні пари для тренування з 3-х і 4-х параметрів

Номер циклу	H_b_1	H_c_1	ρ_1	I_2_1	σ_p	Номер циклу	H_b_1	H_c_1	ρ_1	I_2_1	σ_p
1	152	3,1000	22,1200	2,2341	0	17	183	5,2000	22,5800	2,1791	252,8000
2	156	3,2500	22,3100	2,2729	15,8000	18	160	5,4000	22,5900	2,1638	268,6000
3	187	3,4500	22,3000	2,1843	31,6000	19	151	5,5000	22,3700	2,1971	284,4000
4	183	3,5500	22,4800	2,2293	47,4000	20	150	5,5000	22,0900	2,1795	300,2000
5	181	3,8000	22,3000	2,2271	63,2000	21	133	5,7000	22,4800	2,1671	316,0000
6	170	3,9000	22,5000	2,1979	79,0000	22	127	5,7500	22,5800	2,1777	331,8000
7	164	4,0500	22,0300	2,1925	94,8000	23	135	5,5500	22,7800	2,1873	347,6000
8	170	4,1500	22,2200	2,1813	110,6000	24	126	5,8500	22,6000	2,1232	363,4000
9	178	4,4000	22,7100	2,1774	126,4000	25	123	5,9500	22,7300	2,2213	379,2000
10	173	4,4500	22,4600	2,1847	142,2000	26	124	5,9500	22,6000	2,1790	395,0000
11	174	4,6000	22,4600	2,1743	158,0000	27	123	6,2000	22,9300	2,2068	410,8000
12	155	4,7000	22,6200	2,1882	173,8000	28	140	6,7500	22,9400	2,1558	426,6000
13	168	4,8000	22,4700	2,1796	189,6000	29	127	6,6000	23,3200	2,1540	442,4000
14	176	4,9500	22,3400	2,1765	205,4000	30	117	6,6500	23,4200	2,1530	458,2000
15	169	5,2500	22,5400	2,1741	221,2000	31	122	7,100	23,5700		474,0000
16	158	5,000	22,6200	2,2234	237,0000						

Наступним кроком було створення нейромережі для типових задач та архітектур відповідно для трьох і чотирьох параметрів. Навчання проводилось за стандартною процедурою у середовищі програми Matlab Neural Network Toolbox. У прихованих шарах міститься функція перетворення $tansig$, а у вихідному нейроні відображений $logsig$ [15] (рис. 1, а, б).

Після стандартного процесу навчання на навчальних парах, сформованих із даних першої зони (1-го перерізу) експериментального зразка № 1, наступним етапом є тестування натренованих нейромереж. Дані для тестування, а саме тестові пари для трьох (HB_3, HC_3, ρ_3) і чотирьох ($HB_3, HC_3, \rho_3, I2_3$) параметрів бралися з третьої зони (3-го перерізу) експериментальної посудини № 1 (табл. 2). Вони не використовувалися під час процесу тренування і є невідомими для нейромережі.

Після тестування одержано табличні та графічні результати тестового напруження (σ_p) для 3-х та 4-х інформативних параметрів (табл. 3, рис. 2).

Зображені на рис. 2, а, б результати свідчать про високу точність і повторюваність результатів розрахунку напружень у стінці змодельованих посудин під тиском по всьому діапазону значень. Це підтверджується кількісними оцінками – під час

визначення тестового значення напруження σ_p за допомогою трьох інформативних параметрів, де абсолютна похибка становить 30,20 МПа, а відносна похибка складає 6,04 %. Для чотирьох інформативних параметрів середня абсолютна похибка становить 44,99 МПа, відносна похибка складає 9,01 %. Це може свідчити про надмірну стохастичність даних – більша кількість інформативних параметрів, а також інформація, яку вони несуть, є надмірними апроксимації напруження в стінці посудини як функції інформативних параметрів.

Четвертим та останнім етапом є перевірка (верифікація) роботи нейромережі на інших невідомих даних. Для перевірки нейромережі були використані дані, одержані експериментальним шляхом із дослідного зразка посудини, що працює під тиском № 2. Для початку перевірки нейромережі були сформовані тестові пари з 3-х (HB_1-3, HC_1-3, ρ_1-3) та 4-ох ($HB_1-3, HC_1-3, \rho_1-3, I2_1-3$) параметрів (табл. 4). Дані взято з 3-х зон (3-х перерізів) посудини, рівномірно розташованих вздовж осі експериментального зразка.

Після виконаної перевірки нейромережі з невідомими даними на відповідно сформованих

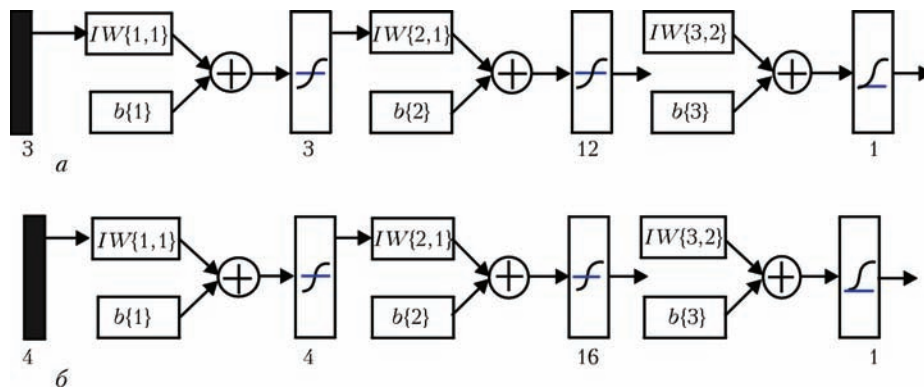


Рис. 1. Архітектура нейромережі для визначення напружень: а – за трьома параметрами; б – за чотирма параметрами

Таблиця 2. Результати вимірювань, які формують тестові пари для тестування з 3-х та 4-х параметрів

Номер циклу	HB_3	HC_3	ρ_3	$I2_3$	σ_p	Номер циклу	HB_3	HC_3	ρ_3	$I2_3$	σ_p
1	161	3,2000	23,9200	2,2683	0	17	161	5,4500	24,4800	2,1646	252,8000
2	163	3,2500	24,1600	2,2537	15,8000	18	160	5,3500	24,2800	2,1861	268,6000
3	184	3,4000	23,6000	2,1772	31,6000	19	155	5,5000	24,5600	2,1631	284,4000
4	155	3,4500	23,8600	2,2099	47,4000	20	168	5,5000	24,5700	2,1875	300,2000
5	152	3,6500	23,9100	2,2168	63,2000	21	145	5,4000	24,4500	2,1954	316,0000
6	160	3,8500	23,0400	2,2060	79,0000	22	140	5,5000	24,4800	2,1820	331,8000
7	160	4,0000	24,1900	2,1920	94,8000	23	124	5,7000	24,5900	2,2103	347,6000
8	159	4,1500	24,1300	2,1757	110,6000	24	118	5,8000	24,3500	2,1397	363,4000
9	166	4,3000	24,0200	2,2045	126,4000	25	130	6,1000	24,5100	2,2317	379,2000
10	163	4,5000	24,0300	2,2223	142,2000	26	135	6,1000	25,1100	2,1695	395,0000
11	151	4,5500	23,9400	2,1677	158,0000	27	111	6,3500	25,2900	2,1665	410,8000
12	153	4,6000	23,8900	2,1526	173,8000	28	110	6,5500	25,3900	2,2017	426,6000
13	158	4,7000	23,2600	2,1710	189,6000	29	119	6,7500	25,5800	2,1704	442,4000
14	151	4,8000	24,0800	2,1572	205,4000	30	133	7,0500	25,9200	2,1660	458,2000
15	156	5,4000	24,0800	2,1661	221,2000	31	115	7,3500	26,4100	2,1404	474,0000
16	161	5,2500	21,7500	2,1593	237,0000						

Таблица 3. Результаты тестового нагружения для 3-х та 4-х параметрів

Для 3-х параметрів								
Номер циклу	σ_p	σ_t	Номер циклу	σ_p	σ_t	Номер циклу	σ_p	σ_t
1	0	8,6681	12	173,8000	169,6637	23	347,6000	418,1062
2	15,8000	15,9820	13	189,6000	174,3125	24	363,4000	430,6116
3	31,6000	23,7849	14	205,4000	242,8877	25	379,2000	431,5938
4	47,4000	57,9770	15	221,2000	308,5387	26	395,0000	436,9876
5	63,2000	67,4354	16	237,0000	247,1077	27	410,8000	476,6633
6	79,0000	78,0489	17	252,8000	312,6606	28	426,6000	481,4177
7	94,8000	72,9595	18	268,6000	302,0068	29	442,4000	481,7637
8	110,6000	73,4069	19	284,4000	330,0168	30	458,2000	482,5426
9	126,4000	90,9740	20	300,2000	305,8433	31	474,0000	490,4028
10	142,2000	121,0522	21	316,0000	340,8225			
11	158,0000	160,5068	22	331,8000	360,9450			
Для 4-х параметрів								
Номер циклу	σ_p	σ_t	Номер циклу	σ_p	σ_t	Номер циклу	σ_p	σ_t
1	0	34,3113	12	173,8000	201,2956	23	347,6000	427,2056
2	15,8000	41,1171	13	189,6000	198,7092	24	363,4000	422,7019
3	31,6000	37,2444	14	205,4000	244,8952	25	379,2000	450,9717
4	47,4000	56,2453	15	221,2000	339,4137	26	395,0000	455,1968
5	63,2000	78,8201	16	237,0000	225,8009	27	410,8000	473,9439
6	79,0000	86,1075	17	252,8000	358,5463	28	426,6000	480,2470
7	94,8000	118,7270	18	268,6000	341,7251	29	442,4000	481,7797
8	110,6000	136,4392	19	284,4000	373,4156	30	458,2000	484,3236
9	126,4000	159,3184	20	300,2000	367,3988	31	474,0000	489,5550
10	142,2000	197,6886	21	316,0000	371,1362			
11	158,0000	198,6906	22	331,8000	386,6234			

Таблица 4. Тестові набори даних з 3-х і 4-х параметрів для перевірки нейромережі

Номер	HB_1-3	HC_1-3	P_1-3	I2_1-3	σ_p	Номер	HB_1-3	HC_1-3	ρ_{1-3}	I2_1-3	σ_p
1	161	4,6000	21,1900	2,1625	0	10	140	5,5000	22,0400	2,1500	212,8000
	165	4,4000	22,3800	2,1389	30,4000		165	5,1000	21,2600	2,1569	212,8000
2	175	4,5000	21,8200	2,1641	30,4000	11	156	5,5000	22,2300	2,1405	228,0000
	154	4,5000	21,1200	2,1735	30,4000		139	5,7000	22,0100	2,1871	228,0000
3	160	4,5000	28,2000	2,1533	60,8000	12	152	5,1000	21,1700	2,1621	228,0000
	143	4,6000	22,2100	2,1657	60,8000		147	5,6000	22,2300	2,1381	243,2000
4	173	4,4000	21,0500	2,1970	60,8000	13	123	5,8000	22,0700	2,1617	243,2000
	150	4,6000	22,0500	2,1711	91,2000		147	5,7000	21,1900	2,1597	243,2000
5	151	4,6000	21,9800	2,1970	91,2000	14	139	5,8000	22,1500	2,1594	258,4000
	171	4,4000	21,1000	2,2251	91,2000		148	5,7000	22,0800	2,1469	258,4000
6	143	4,8000	22,0800	2,1562	121,6000	15	137	5,5000	21,1500	2,1500	258,4000
	161	4,8000	22,1700	2,1910	121,6000		149	5,9000	22,3100	2,1350	273,6000
7	137	4,6000	21,1200	2,1713	121,6000	16	144	6,1000	22,1700	2,1641	273,6000
	158	4,8000	22,1400	2,2048	152,0000		155	5,8000	21,1700	2,1345	273,6000
8	154	5,1000	22,1900	2,1522	152,0000	17	140	6,1000	22,3200	2,1515	288,8000
	169	4,8000	21,1600	2,1571	152,0000		133	6,1000	22,0300	2,1492	288,8000
9	151	4,9000	22,0700	2,1727	162,2000	18	152	5,8000	21,1900	2,1619	288,8000
	139	5,2000	22,3000	2,1555	162,2000		141	6,2000	22,0900	2,1349	304,0000
10	164	4,7000	21,2000	2,1845	162,2000	19	134	6,1000	22,0100	2,1251	304,0000
	149	5,2000	22,2000	2,1709	182,4000		141	5,8000	21,9500	2,1495	304,0000
11	127	5,3000	22,0800	2,1983	182,4000	20	143	5,8000	22,2200	2,1280	228,0000
	152	4,9000	21,2100	2,1952	182,4000		137	5,7000	22,2000	2,1448	228,0000
12	151	5,1000	22,1400	2,1473	197,6000	21	163	5,2000	21,1600	2,1628	228,0000
	140	5,4000	22,2100	2,1525	197,6000		147	5,1000	22,1600	2,1517	152,0000
13	163	5,2000	21,3100	2,1979	197,6000	22	150	4,5000	22,0600	2,1734	152,0000
	134	5,4000	22,2900	2,1689	212,8000		157	4,7000	21,2200	2,1962	152,0000

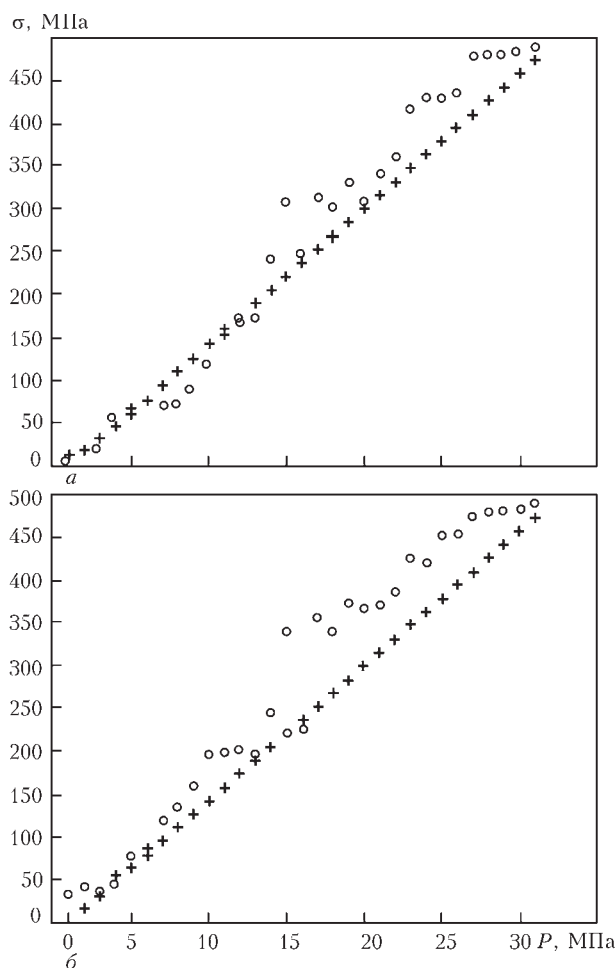


Рис. 2. Результати тестового напруження σ_T (o – тестові значення) порівняно до розрахункового напруження σ_P (+ – розраховані значення) залежно від тиску випробування P : а – для 3-х параметрів; б – для 4-х параметрів

тестових парах одержано табличні та графічні результати тестового значення напруження σ_T за відомого розрахункового значення σ_P (табл. 5, рис. 3).

Під час перевірки нейромережі з визначення напруження σ_T за допомогою 3-х параметрів середня абсолютна похибка становить 59,98 МПа, відносна похибка складає 12,0 %. Для 4-х інформативних параметрів середня абсолютна похибка становить 53,15 МПа, відносна похибка складає 10,6 %. У цьому випадку спостерігається протилежна попереднім результатам ситуація, яка загалом узгоджується із теорією – чим більше інформативних параметрів, тим вища точність апроксимації.

Графічно представлені результати верифікації роботи нейромереж на невідомих для них зразках посудин під тиском (рис. 3, а, б) вказують на достатню чутливість до зміни значень інформативних параметрів в усьому діапазоні значень напружень і реакцію на зниження напружень, відсутність суттєвої відмінності у точності вимірювань між трьома та чотирма інформативними параметрами.

Використання штучних нейронних мереж дає можливість також одержати апроксимовану за-

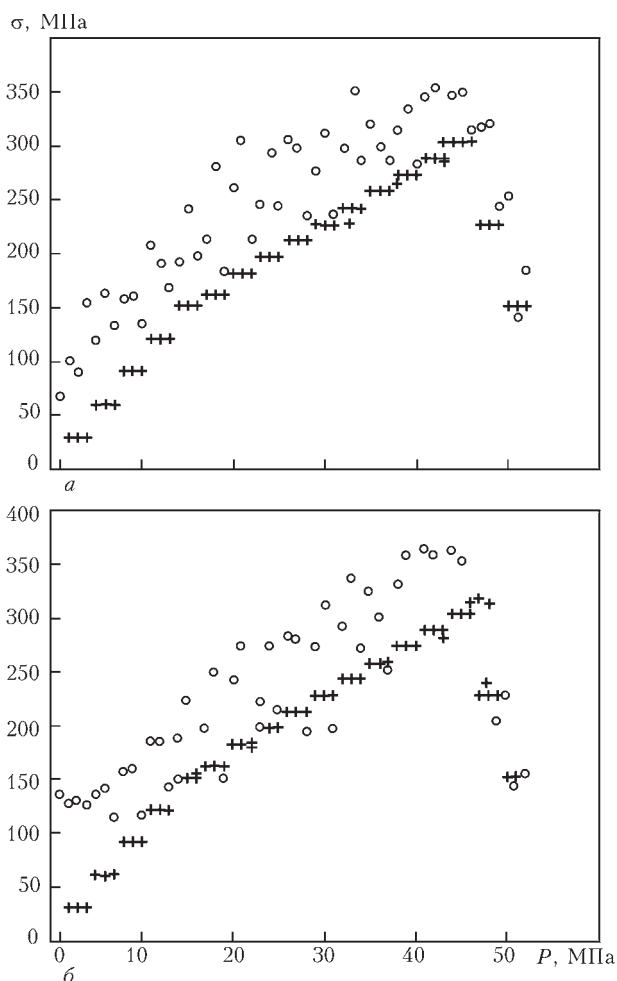


Рис. 3. Результати перевірки нейромережі з визначення напруження σ_T (o – значення, одержані за результатами роботи нейромереж) порівняно до розрахункового напруження σ_P (+ – дійсні значення за результатами розрахунку) залежно від тиску випробування P : а – для 3-х параметрів; б – для 4-х параметрів

лежність в аналітичному вигляді – матричне рівняння з функціями перетворення та ваговими коефіцієнтами, що змінюються в процесі навчання нейронної мережі. Отже, формула для визначення середнього розміру за трьома параметрами (HB , HC , ρ) має вигляд:

$$\sigma = \frac{500}{1 + e^{-2 \sum_{n=1}^{12} -(LW\{2,3\} + e^A)}} + b\{3\},$$

$$\text{де } A = -2 \left(\sum_{n=1}^{12} -(LW\{2,1\} \times \right. \quad (1)$$

$$\left. \times \left(\frac{2}{1 + e^{-2 \sum_{n=1}^{12} (IW\{1,1\} \cdot \left[\left(\frac{HB}{200} \right) \cdot \left(\frac{HC}{8} \right) \cdot \left(\frac{RO}{27} \right) \right] + b\{1\}}} \right) - 1 \right) \right) + b\{2\}$$

де σ – напруження; HB – твердість за шкалою Брінеля; HC – коерцитивна сила; RO – питомий електричний опір; $IW\{1,1\} = [1,7431 - 3, 0389 - 3, 0193; 0,042401 - 6,5667 - 1,2504; 3,8403 - 1,8042 - 2,4633]$; $b\{1\} = [3,1597; 1,6562; 0,83545]$;

Таблиця 5. Результати перевірки нейромережі з визначення тестового значення σ_t

Для 3-х параметрів								
№	σ_p	σ_t	№	σ_p	σ_t	№	σ_p	σ_t
1	0	69,3000	8	182,4000	262,1210	14	273,6000	335,1848
2	30,4000	102,3000		182,4000	306,6386		273,6000	282,5109
	30,4000	91,5000	9	182,4000	214,4560	15	288,8000	346,7486
3	30,4000	155,8828		197,6000	246,0279		288,8000	353,4465
	60,8000	120,3000	10	197,6000	294,7686	16	288,8000	286,2801
60,8000	163,3251	212,8000		306,4363	304,0000		346,8254	
4	60,8000	134,3419	11	212,8000	298,4546	17	304,0000	350,8004
	91,2000	158,9454		212,8000	236,8942		228,0000	314,6647
5	91,2000	159,5901	12	228,0000	278,5863	18	228,0000	317,0751
	91,2000	135,9391		228,0000	312,5776		228,0000	319,9417
6	121,6000	208,5419	13	228,0000	236,9155	19	152,0000	253,0097
	121,6000	191,9125		243,2000	298,2399		152,0000	140,9849
7	121,6000	169,2806	14	243,2000	351,0026	20	152,0000	185,8112
	152,0000	192,7478		243,2000	286,5624			
8	152,0000	242,3489	15	258,4000	322,2179	21		
	152,0000	198,8227		258,4000	300,3764			
9	162,2000	215,1495	16	258,4000	286,3474	22		
	162,2000	281,6993		273,6000	315,8764			
10	162,2000	184,8947	17			23		

Для 4-х параметрів								
№	σ_p	σ_t	№	σ_p	σ_t	№	σ_p	σ_t
1	0	135,7311	8	182,4000	242,6554	14	273,6000	358,6738
2	30,4000	127,7975		182,4000	274,0480		273,6000	273,9361
	30,4000	130,7740	9	182,4000	179,7348	15	288,8000	365,1160
3	30,4000	126,4653		197,6000	221,6337		288,8000	359,5746
	60,8000	135,9000	10	197,6000	273,0342	16	288,8000	281,3675
60,8000	141,7000	197,6000		213,4183	304,0000		363,8543	
4	60,8000	112,7810	11	212,8000	284,2955	17	304,0000	353,5924
	91,2000	156,8378		212,8000	279,6074		304,0000	314,0882
5	91,2000	159,0774	12	212,8000	193,4630	18	228,0000	318,5891
	91,2000	117,3461		228,0000	272,4875		228,0000	313,4228
6	121,6000	185,2174	13	228,0000	312,8174	19	228,0000	204,4554
	121,6000	184,7817		228,0000	197,8580		152,0000	225,5173
7	121,6000	142,9037	14	243,2000	291,9623	20	152,0000	144,3275
	152,0000	187,8217		243,2000	336,4444		152,0000	153,9594
8	152,0000	222,2296	15	243,2000	272,2808	21		
	152,0000	155,3081		258,4000	325,4496			
9	162,2000	197,3875	16	258,4000	300,1749	22		
	162,2000	250,1193		258,4000	251,5114			
10	162,2000	149,6889	17	273,6000	330,9292	23		

$LW\{2,1\} = [-2,6414 \ 2,439 \ -2,6484; -0,11555 \ -1,3002 \ -2,3494; -0,26707 \ -3,4977 \ -0,9879; -4,3283 \ -0,56173 \ -1,7194; 3,6251 \ 3,3037 \ 0,0079697; 3,0503 \ 0,4122 \ -0,75152; 1,4864 \ -2,2745 \ 2,2322; -0,58323 \ -0,99362 \ 2,9626; -1,0301 \ 2,231 \ -2,0604; -3,8824 \ -4,8745 \ 2,9746; -2,8029 \ -2,9665 \ 0,26002; 1,9492 \ -0,56367 \ 2,4798] LW\{2,3\} = [3,4791 \ -0,72835 \ 1,6159 \ -1,513 \ -0,58511 \ 0,10175 \ 0,30046 \ -0,020476 \ 0,82736 \ 3,7615 \ 2,2226 \ -1,1307] b\{2\} = [2,6779; 3,0984; 2,2409; 2,522; -0,52367; -2,0915; 0,90781; -0,90616; -1,4632; 0,64351; -1,9935; 3,2007] b\{3\} = [-0,35259]$

Формула (1) насправді відображає порядок виконання розрахунків виходів вихідного та прихованих шарів нейромережі відповідно до використовуваної архітектури (рис. 3) при поданні на

вхід вектора з трьома інформативними параметрами – перемноження цього вектора на вагові коефіцієнти, розрахунку їх за функцією перетворення з передачею на наступний нейрон і так далі [15].

Таким чином, застосування алгоритмів штучних нейронних мереж для опрацювання одержаних експериментальних результатів дало змогу зробити наступні висновки – за умови мінімальної кількості інформативних параметрів похибка визначення напруження за трьома інформативними параметрами (HB, HC, ρ) згідно з формулою (1) є меншою за похибку визначення напруження за чотирма параметрами (HB, HC, ρ, I_2) і складає 6,04 %, що не перевищує 12 % на нових зразках посудин під тиском. Такий рівень похибок є ціл-

ком прийнятним для виробничої практики за умови відсутності інших підходів і методик. Окрім того, рівень похибки можна суттєво знизити завдяки більшій кількості дослідів на посудинах під тиском, особливо на початку і в кінці діапазону вимірювань (див. рис. 3).

Доцільно навести пояснення, чому похибка тестування нейронних мереж в разі використання чотирьох параметрів вища, ніж для трьох, а у випадку верифікації – навпаки. Загальним поясненням цього є значна стохастичність інформативних параметрів в випадку верифікації нейронних мереж, а конкретним поясненням може слугувати недостатня репрезентативність результатів вимірювань, використаних для верифікації. Крім того, різниця похибок (в межах 1,5 %) не є значною для такого роду досліджень і ніяким чином не спростовує обґрунтованості запропонованого підходу.

Одержана аналітична залежність (1) дає можливість визначати напруження, що діють у металоконструкції, за допомогою комплексу тривимірних інформативних параметрів відповідно до описаної у статті методики.

Слід зазначити, що отримані результати за умови виконання перевірочних досліджень можуть бути поширені на трубопроводи для визначення напружень в їх стінках, оскільки типовий режим їх навантаження відповідає режиму роботи об'єктам посудин під тиском, що були об'єктами досліджень в цій роботі. Також наступним етапом досліджень є експериментальна перевірка запропонованого методу на посудинах під тиском, що перебувають в експлуатації ДП «Укравтогаз».

Висновки

За результатами експериментальних та аналітичних досліджень доведено й експериментально підтверджено новий напрямок визначення напружень у стінці посудини під тиском за трьома інформативними параметрами, одержаними шляхом вимірювання засобами неруйнівного контролю – твердості, питомого електричного опору та коерцитивної сили. Також одержано аналітичну залежність, яка має чітко виражений нелінійний характер між величиною напруження та величинами інформативних параметрів, для їх апроксимації використано алгоритми штучних нейронних мереж. Точність визначення напружень досить висока, оскільки абсолютна похибка становить 30,20 МПа, відносна похибка складає 6,04 %.

Список літератури

1. Постанова Кабінету Міністрів України «Про затвердження Державної науково-технічної програми «Ресурс» від 8 жовтня 2004 р. № 1331. Документ 1331-2004-п, чинний.
2. Кошовий В. В. (2001) Про оцінку переддефектного стану матеріалу методами ультразвукової обчислювальної томографії. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, **37**, 118–132.
3. Назарчук З. Т., Тетерко А. Я., Рибачук В. Г., Кулинич Я. П. (2006) Комплекс технічних засобів для електромагнітно-

го неруйнівного контролю конструкцій тривалої експлуатації. *Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин*. Зб. наук. статей за результатами, отриманими в 2004–2006 рр. Київ, ІЕЗ ім. С. О. Патона НАН України.

4. Кондратенко І. П., Божко І. В., Жильцов А. В., Васюк В. В. (2013) Методи визначення залишкових напружень. *Праці ТДАТУ*, **13(2)**, 127–135.
5. Дубов А. А., Демин Е. А. и др. (2002) Контроль напряженно-деформированного состояния газопроводов. *Газовая промышленность*, **2**, 58–61.
6. Дубов А. А. (2016) Принципиальные отличия метода магнитной памяти от других известных методов неразрушающего контроля. Итоги и перспективы различия. *Территория NDT*, **2**, 64–68.
7. Безлюдько Г. Я., Марченко А. Ю., Соломаха Р. Н. (2011) Оценка технического состояния и остаточного ресурса оборудования по измерениям магнитной характеристики – коэрцитивной силы. *Материали 6-ї науково-технічної конференції «Сучасні прилади і технології НКІТД нафтогазопромислового обладнання»*. м. Івано-Франківськ, сс. 78–84.
8. Миндюк В. Д., Доценко Є. Р., Карпаш М. О. (2011) Особливості деградації структури матеріалів металоконструкцій довготривалої експлуатації та оцінка можливості її діагностування в нафтогазовому комплексі. *Науковий вісник ІФНТУНГ*, **2(28)**, 91–97.
9. Карпаш А. М. (2016) Особливості експериментальних модельних об'єктів та постановка експерименту для визначення напружено-деформованого стану металоконструкцій за комплексом інформативних параметрів. *Нафтогазова енергетика*, **1(25)**, 91–101.
10. Карпаш А. М. (2016) Експериментальні дослідження та практика визначення залишкового ресурсу металоконструкцій довготривалої експлуатації з врахуванням напруженого стану. *Материали 8-ї Національної науково-технічної конференції «Неруйнівний контроль та технічна діагностика – UkrNDT-2016, м. Київ, 22–24 листопада 2016 р.* Київ, УТ НКІТД, сс. 193–196.
11. ГОСТ 1497–84. (1984) Методы испытаний на растяжение. Москва, Изд. стандартов.
12. ГОСТ 142491984–89. (1989) Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Москва, Изд. стандартов.
13. Писаранеко Н. С. (1975) *Справочник по сопротивлению материалов*. Киев, Наукова думка.
14. Карпаш М. О. (2013) *Розвиток методів, засобів та технологій багатопараметрового контролю технічного стану магістральних трубопроводів*: автореферат дис. докт. техн. наук. Івано-Франківськ, Івано-Франків. нац. техн. ун-т нафти і газу.
15. Хайкин С. (2006) *Нейронные сети: полный курс, 2-е издание*. Пер. с англ. С. Хайкин. Москва, ИД «Вильямс».

References

1. Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy «Pro zatverdzhennia Derzhavnoi naukovo-tekhnichnoi prohramy «Resurs» vid 8 zhovtnia 2004 r. № 1331. Dokument 1331-2004-p, chynnyi. [in Ukrainian].
2. Koshoviy V. V. (2001) Pro otsinku pereddefektnoho stanu materialu metodamy ultrazvukovoi obchysluvalnoi tomohrafiy. *Fizyko-khimichna mekhanika materialiv*, **37**, 118–132. [in Ukrainian]
3. Nazarchuk Z. T., Teterko A. Ya., Rybachuk V. H., Kulynych Ya. P. (2006) Kompleks tekhnichnykh zasobiv dlia elektromagnitnoho neruivnivnoho kontroliu konstruksii tryvaloi ekspluatatsii. *Problemy resursu i bezpeky ekspluatatsii konstruksii, sporud ta mashyn*. Zbir. nauk. statei za rezultatamy, otrzymanymy v 2004–2006 rr. Kyiv, IEZ im. E. O. Patona NAN Ukrainy. [in Ukrainian]
4. Kondratenko I. P., Bozhko I. V., Zhylytsov A. V., Vasiuk V. V. (2013) Metody vyznachennia zalyshkovykh napruzhen. *Pratsi TDAU*, **13(2)**, 127–135. [in Ukrainian]
5. Dubov A. A., Demin Ye. A. i dr. (2002) Kontrol napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya gazoprovodov. *Газовая промышленность*, **2**, 58–61. [in Russian].

6. Dubov A. A. (2016) Printsipialnye otlichiya metoda magnitnoy pamyati ot drugikh izvestnykh metodov nerazrushayushchego kontrolya. Itogi i perspektivy razlichiya. *Territoriya NDT*, 2, 64–68. [in Russian]
7. Bezlyudko G. Ya., Marchenko A. Yu., Solomakha R. N. (2011) Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya i ostatochnogo resursa oborudovaniya po izmereniyam magnitnoy kharakteristiki – koertsitivnoy sily. *Materialy 6-oi naukovno-tekhnichnoi konferentsii «Suchasni prylyady i tekhnolohii NKiTD naftohazopromysloвого obladdannia»*. m. Ivano-Frankivsk, ss. 78–84. [in Russian]
8. Myndiuk V. D., Dotsenko Ye. R., Karpash M. O. (2011) Osoblyvosti dehradatsii struktury materialiv metalokonstrukttsii dovhotryvaloi ekspluatatsii ta otsinka mozhlyvosti yii diahnostuvannia v naftohazovomu kompleksii. *Naukovyi visnyk IFNTUNH*, 2(28), 91–97. [in Ukrainian]
9. Karpash A. M. (2016) Osoblyvosti eksperymentalnykh modelnykh ob'ektiv ta postanovka eksperymentu dlia vyznachennia napruzhenno-deformovanoho stanu metalokonstrukttsii za kompleksom informatyvnykh parametriv. *Naftohazova enerhetyka*, 1(25), 91–101. [in Ukrainian]
10. Karpash A. M. (2016) Eksperymentalni doslidzhennia ta praktyka vyznachennia zalyshkovoho resursu metalokonstrukttsii dovhotryvaloi ekspluatatsii z vrakhuvanniam napruzhenoho stanu. *Materialy 8-i Natsionalnoi naukovno-tekhnichnoi konferentsii «Neruinivnyi kontrol ta tekhnichna diahnostyka – UkrNDT-2016»*, m. Kyiv, 22–24 lystopada 2016 r. Kyiv, UT NKTD, ss. 193–196. [in Ukrainian]
11. GOST 1497–84. (1984) Metody ispytany na rastyazheniye. Moskva, Izd. standartov. [in Russian]
12. GOST 142491984–89. (1989) Sosudy i apparaty. Normy i metody rascheta na prochnost. Moskva, Izd. standartov. [in Russian]
13. Pisaneko N. S. (1975) *Spravochnik po soprotivleniyu materialov*. Kiyev, Naukova dumka. [in Russian]
14. Karpash M. O. (2013) *Rozvytok metodiv, zasobiv ta tekhnolohii bahatoparametrovoho kontroliu tekhnichnoho stanu mahistralnykh truboprovodiv*. avtoreferat dys. dokt. tekhn. nauk. Ivano-Frankivsk, Ivano-Frankiv. nats. tekhn. un-t nafty i hazu. [in Ukrainian]
15. Khaykin S. (2006) *Neyronnye seti: polny kurs, 2-e izdaniye*. Per. s angl. S. Khaykin. Moskva, ID «Vilyams». [in Russian]

A. M. КАРПАШ¹, Н. Л. ТАЦАКОВИЧ², М. О. КАРПАШ¹

¹ООО «Научно-производственная фирма «Зонд». 76002, г. Ивано-Франковск, ул. Микитинецкая, 5, а.
E-mail: ndi@zond-ndt.com

²Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа. 76019, г. Ивано-Франковск, ул. Карпатская, 15.
E-mail: karpash@nung.edu.ua

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ СОСУДОВ, РАБОТАЮЩИХ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Исследовалась возможность использования результатов измерения способами неразрушающего контроля структурно-чувствительных характеристик (коэффициент теплопроводности,

удельная электропроводность, ударная вязкость, твердость) для определения места и уровня напряжений в материалах металлоконструкций длительной эксплуатации. Проведена серия экспериментальных исследований на специально изготовленных масштабированных сосудах, работающих под давлением. Учитывая существенную нелинейность, разную точность и достоверность измеренных информативных параметров, принято решение использовать алгоритмы искусственных нейронных сетей для обработки массива экспериментальных данных. По результатам проведенных исследований доказана возможность определения напряжений в стенках сосудов по трем информативным параметрам: твердость, удельное электрическое сопротивление, коэффициент коррозионной силы и получена аналитическая зависимость матричного уравнения для определения уровня напряжений в материалах металлоконструкций. Библиогр. 15, табл. 5, рис. 3.

Ключевые слова: напряжение, информативные параметры, многопараметровая диагностика, алгоритмы искусственных нейронных сетей

A. M. KARPASH¹, N. L. TATSAKOVICH², M. O. KARPASH¹

¹ «Scientific-production company «Zond» LLC, 5a Mykytynetska str., Ivano-Frankivsk, 76002
E-mail: zond.ndt@gmail.com

²Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 15 Karpatska str., Ivano-Frankivsk, 76019
E-mail: mkarpash@nung.edu.ua

IMPROVEMENT OF METHOD FOR DETERMINATION OF STRESSED STATE OF PRESSURIZED PIPELINES AND VESSELS

The possibility was investigated on application of the results of NDT measurement of structural-sensitive characteristics (heat conduction coefficient, specific electric conductance, impact toughness, hardness) for determination of place and level of stresses in the material of metal structures of long-term operation. A series of experiments was carried out on specially manufactured test samples in form of scaled pressurized vessels. Taking into account significant nonlinearity and different accuracy and reliability of measured informative parameters it was concluded to apply the algorithms of artificial neuron nets for processing experimental data set. The results of carried investigations proved the possibility of determination of stresses in vessel walls by three informative parameters, namely hardness, specific electric resistance, coefficient of corrosion strength. An analytical dependence of matrix equation was received for determination of level of stresses in metal structures' materials. Ref. 15, Tables 5, Figures 3

Keywords: stresses, informative parameters, multi-parameter diagnostics, algorithms of artificial neuron nets.

Надійшла до редакції
07.02.2017

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕНТГЕНОВСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЦИФРОВОЙ РЕНТГЕНТЕЛЕВИЗИОННОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО ЭКРАНА И ПЗС-МАТРИЦЫ

В. А. ТРОИЦКИЙ¹, С. Р. МИХАЙЛОВ², Д. С. ШИЛО²

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

²НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского». 03056, Киев-56, пр-т Победы, 37. E-mail: fel@kpi.ua

Выполнено сравнение рентгеновских изображений, формируемых цифровой рентгентелевизионной системой прямого преобразования типа «сцинтилляционный экран–объектив–ПЗС-матрица» с изображениями, полученными при моделировании этой системы. Универсальность математической модели, на которой базируется расчет изображений, позволяет на этапе проектирования рентгентелевизионной системы определить оптимальные режимы ее работы. Модель может быть адаптирована под конкретную техническую задачу, что дает более точную оценку параметров проектируемой системы. Так же модель можно адаптировать для расчета параметров рентгентелевизионных систем с детекторами прямого преобразования. Библиогр. 9, рис. 8.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, цифровая радиография, сцинтилляционный экран, рентгентелевизионная система, рентгеновская трубка, ПЗС-матрица, канавочный эталон чувствительности

В современной промышленности вопрос надежности производимой продукции является одним из важнейших. Особенно это касается тех отраслей, продукция которых так или иначе связана с безопасностью человека и окружающей среды. Для оценки качества продукции широко применяются методы неразрушающего контроля. Одним из самых востребованных на сегодняшний день является радиационный метод.

Радиационные системы с промежуточными носителями информации (плёночная радиография, электрорадиография, компьютерная радиография) широко применяются для контроля материалов и изделий в промышленности и обеспечивают высокие относительную чувствительность контроля (1 %) и разрешающую способность (порядка 10 пар лин./мм). Однако такие системы имеют существенные недостатки: невозможность проведения контроля объектов в реальном времени, низкая производительность и высокая стоимость контроля.

Недостатки традиционной радиографии и потребность в высокопроизводительных средствах диагностики стимулировали появление цифровой радиографии, которая позволяет повысить производительность контроля и снизить его стоимость. При использовании методов цифровой радиографии ионизирующее излучение, прошедшее через контролируемый объект, с помощью электронных средств преобразуется в массив электрических сигналов, которые оцифровываются, обрабатываются с помощью компьютерной техники и используются для формирования цифрового изображения контролируемого объекта.

Полученное цифровое изображение объекта содержит информацию о его внутренней структуре и может формироваться непосредственно во время просвечивания, т. е. в реальном времени [1, 2]. Для осуществления цифровой радиографии применяются различные цифровые рентгентелевизионные системы (РТС).

К важным достоинствам РТС следует отнести возможность компьютерной обработки и анализа цифровых изображений, создания электронных архивов цифровых изображений, их документирования и передачи с использованием компьютерных сетей.

Основными задачами для совершенствования РТС являются: повышение чувствительности контроля и разрешающей способности, интенсивное внедрение цифровых технологий, широкое использование новых твердотельных детекторов рентгеновских изображений. Таким образом, разработка цифровых РТС требует решения серьезных научно-технических задач, к числу которых относятся: повышение отношения сигнал/шум и соответственно чувствительности контроля, увеличение квантовой эффективности преобразователей изображения, улучшение пространственной разрешающей способности, оптимизация режимов работы систем для обеспечения высокого качества радиационных изображений. Перечисленные задачи можно решить при помощи математического и физико-топологического моделирования таких систем.

В работах [3–5] предложена модель преобразования теневого рентгеновского изображения исследуемого объекта в цифровой сигнал на выходе РТС, построенных на основе сцинтилляци-

онных экранов и приборов с зарядовой связью (ПЗС-матриц). При помощи данной модели можно подбирать оптимальные режимы работы РТС для исследования тех или иных объектов с целью выявления в них дефектов и неоднородностей; оценить совместимость элементов, которые в них используются; исследовать возможность работы РТС в нестандартных режимах; уменьшить количество экспериментальных испытаний путем оптимизации режимов работы и т. д. Преимуществом данной модели также является ее универсальность, которая позволяет ее использовать также для моделирования систем с детекторами прямого преобразования.

Постановка задачи и цели работы. В процессе проектирования РТС важно иметь возможность оценивать значения ключевых параметров системы без необходимости создания опытного образца. Это позволяет разработчику экономить значительные средства и время на этапе выбора компонентов РТС.

РТС непрямого преобразования типа «сцинтилляционный экран – объектив – ПЗС-матрица» имеют ряд преимуществ перед другими РТС: возможность смены сцинтилляционного экрана, что позволяет изменять размер рабочего поля и другие параметры систем; малое время получения изображения; простота конструкции; малые габариты и вес; низкая стоимость [2].

Такая РТС была разработана в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины и представляет собой аппаратно-программный комплекс,

который состоит из рентгеновского аппарата «Экстравольт-350», рентгеновского преобразователя на основе сцинтилляционного экрана из оксисульфида гадолиния и телевизионной камеры Atik 314L + [6] с ПЗС-матрицей Sony ICX-285AL. В систему входит также компьютер со специальным программным обеспечением для управления режимами работы камеры, цифровой обработки, анализа и архивирования полученных изображений. Предложенная в работах [3–5] математическая модель была использована для моделирования данной РТС.

Структурная схема модели РТС типа «сцинтилляционный экран – объектив – ПЗС-матрица», с помощью которой проводились расчеты при преобразовании рентгеновских изображений, представлена на рис. 1.

Модель учитывает самопоглощение рентгеновских квантов в материале анода рентгеновской трубки, изменение рентгеновского спектра при прохождении исследуемого объекта, характеристики рентгеновского экрана, ПЗС-матрицы и объектива. Она позволяет рассчитывать необходимые характеристики рентгеновского излучения на выходе рентгеновской трубки и за исследуемым объектом, интенсивность свечения экрана, интенсивность света на поверхности ПЗС-матрицы после прохождения оптики, рассчитывать зарядовый пакет в пикселе и выходной сигнал на выходе ПЗС-матрицы, отношение сигнал/шум и квантовую эффективность детектирования рентгеновского преобразователя.

Результаты моделирования. Для того, чтобы оценить достоверность разработанной модели [3],

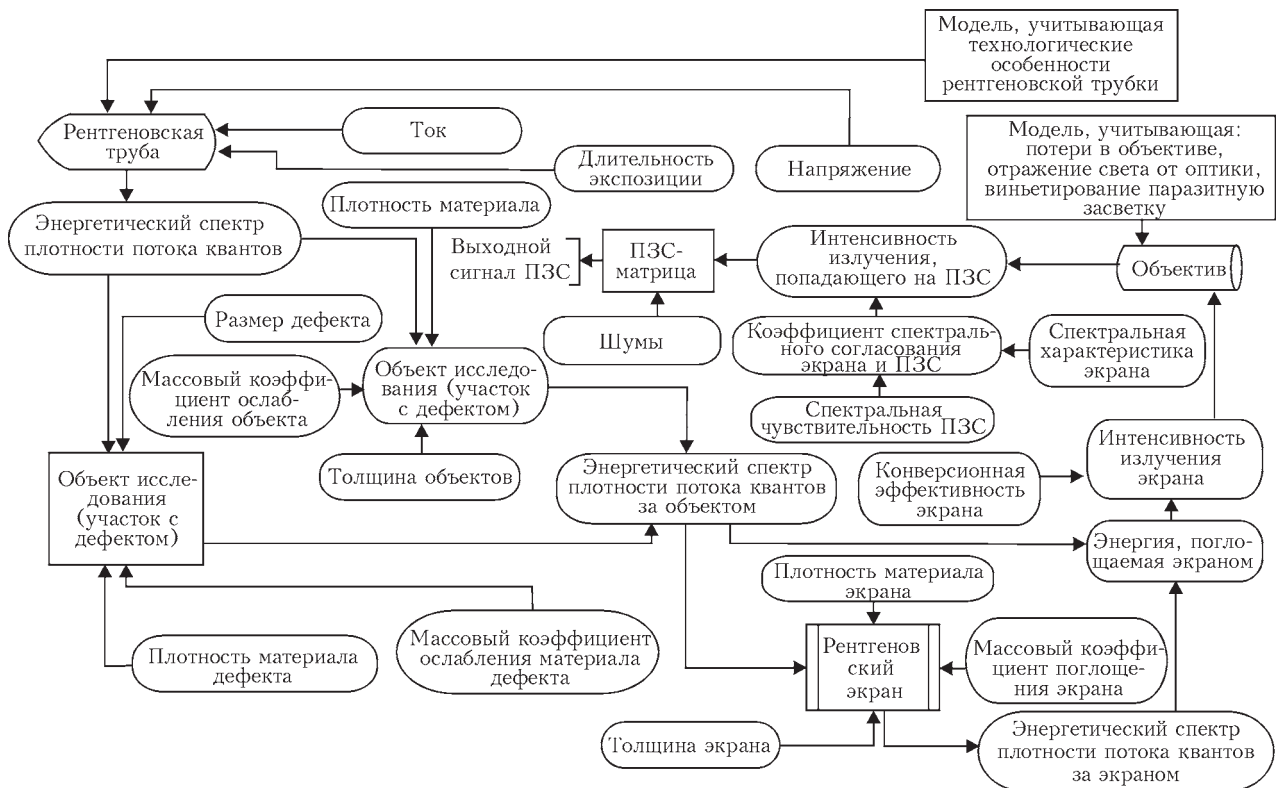


Рис. 1. Структурная схема модели РТС непрямого преобразования типа «сцинтилляционный экран–объектив–ПЗС-матрица»

было выполнено сравнение изображений исследуемого объекта, полученных на выходе разработанной РТС и изображений, которые были рассчитаны теоретически с помощью модели. В качестве объекта контроля использовалась стальная пластина со сварным швом толщиной $H_0 = 10$ мм. На пластине располагался канавочный эталон чувствительности № 1 (Fe), соответствующий ГОСТ 7512–82 (рис. 2) [7, 8].

На рис. 3–6 приведены экспериментальные и рассчитанные негативные изображения, полученные при длительностях накопления (t_i) 10 и 400 с. На практике накопление 400 с требуется далеко не всегда. Такая большая длительность была выбрана, чтобы сравнить результаты моделирования на разных участках динамического диапазона РТС.

На рассчитанных изображениях располагались два канавочных эталона чувствительности: один в центре, а другой – у левого края изображения (рис. 4, 6). Такое расположение эталонов позволяет анализировать влияние неравномерности сигнала по полю изображения на выявляемость канавок эталона.

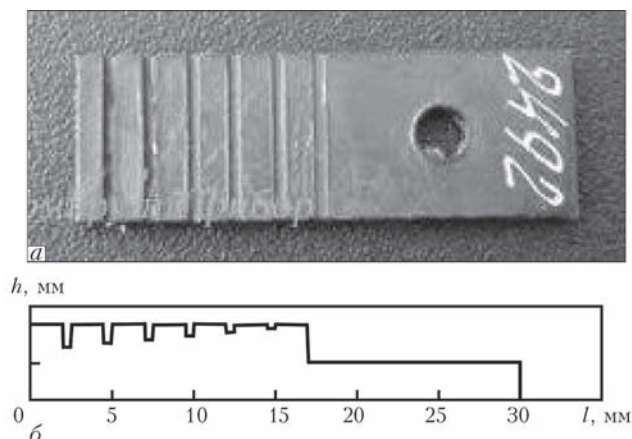


Рис. 2. Канавочный эталон чувствительности № 1 (Fe) в соответствии с ГОСТ 7512–82: а – фото эталона, маркированного отверстием; б – профиль эталона без отверстия, построенный в программном пакете Matlab

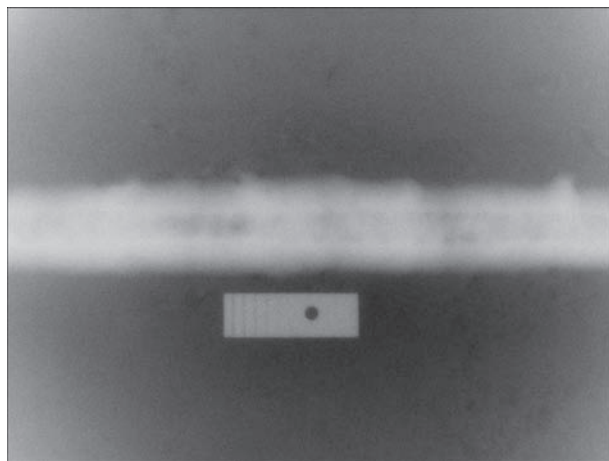


Рис. 3. Негативное изображение сварного шва и канавочного эталона чувствительности, полученное с помощью разработанной РТС (длительность накопления 10 с)

ПЗС-матрица реальной системы охлаждалась до температуры $T = -2,7$ °С при помощи элементов Пельтье. Для отображения полученных изображений на мониторе компьютера, выполнялось их преобразование. Это преобразование создает полутоновое изображение путем контрастирования исходного полутонового изображения. Значения яркости в диапазоне значений гистограммы исходного изображения (разрядность камеры 16 бит) преобразуются в значения яркости для передачи на мониторе персонального компьютера. Гамма-коррекция изображений не осуществлялась, т. е. свет-сигнальная характеристика камеры считалась линейной ($\gamma = 1$).

Рассчитанные изображения (рис. 4, 6) получены при тех же анодных напряжениях и токах рентгеновской трубки, при которых получены соответствующие реальные изображения на выходе разработанной РТС (рис. 3, 5).

Сварной шов не моделировался из-за сложности математического описания распределения его толщины, поэтому на изображениях, полученных при моделировании сварной шов отсутствует. Од-

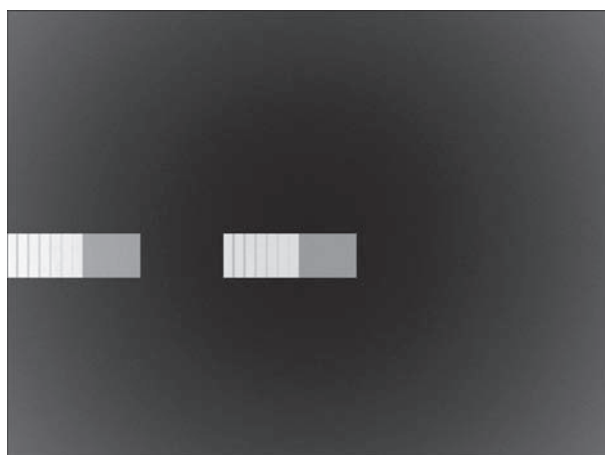


Рис. 4. Негативное изображение канавочных эталонов чувствительности, рассчитанное и сформированное с помощью предложенной модели (длительность накопления 10 с)

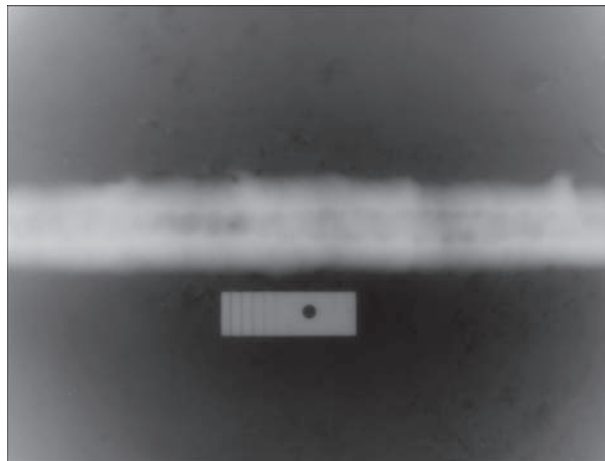


Рис. 5. Негативное изображение сварного шва и канавочного эталона чувствительности, полученное с помощью разработанной РТС (длительность накопления 400 с)

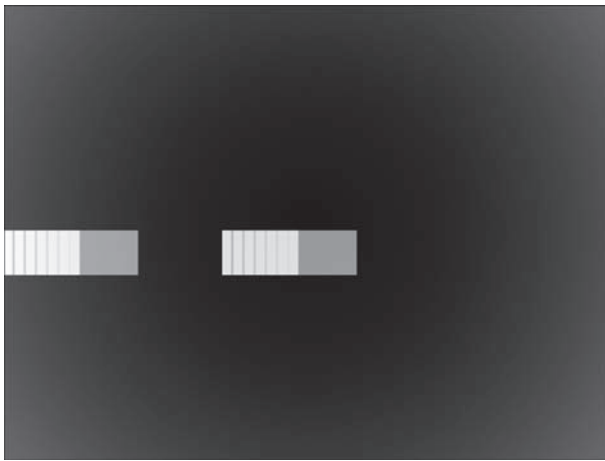


Рис. 6. Негативное изображение канавочных эталонов чувствительности, рассчитанное и сформированное с помощью предложенной модели (длительность накопления 400 с)

нако, если такое распределение будет известно, то его можно использовать для формирования изображения шва с помощью данной модели. Во время моделирования полученные изображения были искажены квантовым шумом и шумом, который обусловлен флуктуациями темнового тока. Остальные механизмы шумов не рассматривались т. к. их уровень был несущественным [9].

Обычно при малой длительности накопления изображение получается достаточно зашумленным, что в значительной степени обусловлено квантовым шумом. Увеличение длительности накопления позволяет увеличить отношение сигнал/шум за счет интегрирования шумов. В разработанной РТС использована высокочувствительная малошумящая камера, что позволило минимизировать собственные шумы системы. Даже при

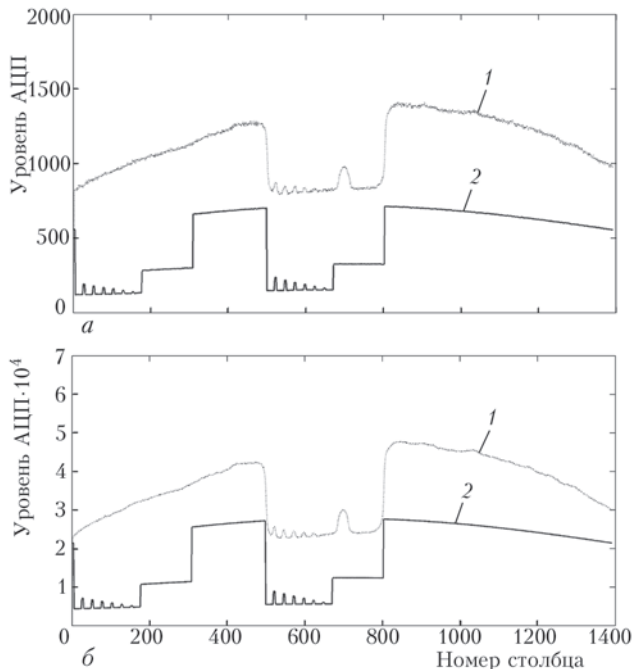


Рис. 7. Усредненные по полю эталона чувствительности строки реального (1) и рассчитанного (2) изображений (позитив): а – время накопления 10 с; б – время накопления 400 с

10 с накопления на реальном изображении видно четвертую канавку эталона чувствительности. Если же увеличивать t_i до 400 с, на изображении можно различить пятую канавку (рис. 5, 6).

На рис. 7 приведены усредненные по полю канавочного эталона чувствительности строки для реального и рассчитанного изображений. Дискретные данные для графического представления были интерполированы кусочными полиномами Эрмита в программном пакете Matlab. Поскольку при моделировании для уменьшения времени расчетов пространственная фильтрация в РТС не учитывалась, то профиль эталона чувствительности на строке рассчитанного изображения имеет четкие контуры, в отличие от закругленных контуров профиля реального эталона. При необходимости пространственную фильтрацию при расчетах можно учесть с помощью предложенной модели преобразования рентгеновского изображения в цифровое.

Вследствие неравномерности распределения рентгеновского излучения в реальных системах возникает искажение изображения, при котором уровень сигнала изменяется в зависимости от размещения объекта исследования под рентгеновской трубкой. Это объясняется неравномерностью распределения интенсивности рентгеновского излучения по полю. На рис. 7 это видно при сравнении строки реального изображения со строкой рассчитанного изображения (при моделировании такое распределение не учитывалось). Уровень фона правой половины строки выше уровня фона левой. Для удобства сравнения результатов на рис. 8 приведены данные в увеличенном масштабе.

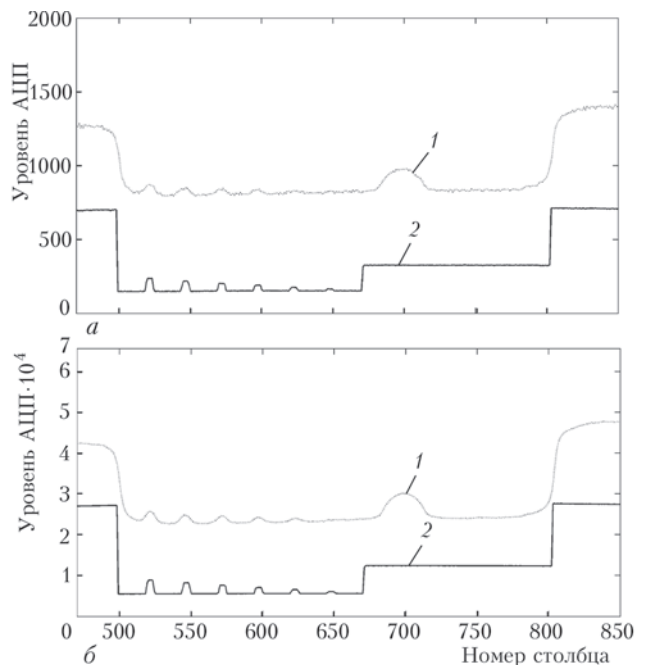


Рис. 8. Фрагменты усредненных по полю эталона чувствительности строк реального (1) и рассчитанного (2) изображений (позитив): а – время накопления 10 с; б – время накопления 400 с

Во время моделирования предполагалось, что уровень черного камеры РТС находится на нулевом уровне квантования АЦП. В реальной же системе уровень черного регулируется электронной схемой камеры и может меняться в зависимости от ее режима работы. Этим объясняется несоответствие уровней фона для строк реального и рассчитанного изображений.

Размеры эталона чувствительности и сигналы от его канавок на рассчитанных изображениях удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Это позволяет заключить, что при помощи предложенной модели [3] можно формировать изображения цифровой РТС, которые с достаточной точностью передают структуру объекта контроля.

Выводы

Предложенная математическая модель учитывает все основные этапы преобразования сигналов в РТС типа «сцинтилляционный экран – объектив – ПЗС-матрица» и позволяет моделировать изображения контролируемых объектов на выходе таких систем.

Полученные в результате моделирования изображения контролируемых объектов с эталонами чувствительности позволяют оценить чувствительность контроля разрабатываемой РТС без проведения эксперимента, что позволяет сэкономить время и средства при разработке таких систем.

Теоретические оценки чувствительности контроля РТС, полученные в результате моделирования, удовлетворительно согласуются с соответствующими экспериментальными.

Список литературы

1. Усачев Е. Ю., Валиков В. В., Точинский Е. Г. и др. (2014) Комплекс цифровой радиографии для ревизии сварных соединений действующих трубопроводов. *Контроль. Диагностика*, **6**, 60–64.
2. Троицкий В. А., Михайлов С. Р., Пастовенский Р. О., Шило Д. С. (2015) Современные системы радиационного неразрушающего контроля. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **1**, 23–35.
3. Шило Д. С. (2015) Моделирование процессов формирования цифрового рентгеновского изображения. *Электроника и связь*, **6**, 34–41.
4. Шило Д. С., Михайлов С. Р., Писаренко Л. Д. (2016) Квантовая эффективность детектирования цифровых рентгенотелевизионных систем на основе сцинтилляционных экранов и ПЗС матриц. *Неразрушающий контроль и диагностика*, **4**, 25–38.
5. Михайлов С. Р. (2002) Моделирование теневого рентгеновского изображения контролируемого объекта в рентгеноскопических системах неразрушающего контроля. *Электроника и связь*, **16**, 59–70.
6. Craig Stark. (2009) Signal to Noise: Understanding it, Measuring it, and Improving it (Part 1). *Cloudy Nights*. <http://www.stark-labs.com/craig/resources/Articles-&-Reviews/SNR-Part-1.pdf>.
7. *Эталон чувствительности канавочный (Fe). № 11, 12, 13*. <http://pgpribor.com/product/etalon-chuvstvitelnosti-kanavochnyy-fe-11-12-13>.

8. (1984) ГОСТ 7512–82. *Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Радиографический метод*. Москва, Изд.-во стандартов.
9. Lowe B.G., Sareen R.A, *Semiconductor X-Ray Detectors*, 65 (CRC Press: 2013).

References

1. Usachev Ye. Yu., Valikov V. V., Tochinsky Ye. G. i dr. (2014) Kompleks tsifrovoy radiografii dlya revizii svarynykh soyedineniy deystvuyushchikh truboprovodov. *Kontrol. Diagnostika*, **6**, 60–64.
2. Troitskii V. A. et al. (2015) Modern systems of radiation non-destructive testing. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **1**, 23-35 [in Russian].
3. Shilo D. S. (2015) Modelirovaniye protsessov formirovaniya tsifrovogo rentgenovskogo izobrazheniya. *Elektronika i svyaz*, **6**, 34–41. [in Russian].
4. Shilo D. S., Mikhaylov S. R., Pisarenko L. D. (2016) Kvantovaya effektivnost detektirovaniya tsifrovyykh rentgenotelevizionnykh sistem na osnove stsintillyatsionnykh ekranov i PZS matrits. *Nerazrushayushchy kontrol i diagnostika*, **4**, 25–38. [in Russian].
5. Mikhaylov S. R. (2002) Modelirovaniye tenevogo rentgenovskogo izobrazheniya kontroliruyemogo obyekta v rentgenoskopicheskikh sistemakh nerazrushayushchego kontrolya. *Elektronika i svyaz*, **16**, 59–70. [in Russian].
6. Craig Stark. (2009) Signal to Noise: Understanding it, Measuring it, and Improving it: (Part 1). *Cloudy Nights*. <http://www.stark-labs.com/craig/resources/Articles-&-Reviews/SNR-Part-1.pdf>.
7. *Etalon chuvstvitelnosti kanavochny (Fe) № 11, 12, 13*. <http://pgpribor.com/product/etalon-chuvstvitelnosti-kanavochnyy-fe-11-12-13>. [in Russian].
8. (1984) GOST 7512–82. *Kontrol nerazrushayushchy. Soyedineniya svarynye. Radiografichesky metod*. Moskva, Izd.-vo standartov. [in Russian].
9. Lowe B.G., Sareen R.A, *Semiconductor X-Ray Detectors*, 65 (CRC Press: 2013). [in Russian].

В. О. ТРОИЦКИЙ¹, С. Р. МИХАЙЛОВ², Д. С. ШИЛО²

¹ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України. 03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua
²НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, пр-т Перемоги, 37. E-mail: fel@kpi.ua

МОДЕЛЮВАННЯ РЕНТГЕНІВСЬКИХ ЗОБРАЖЕНЬ ЦИФРОВОЇ РЕНТГЕНТЕЛЕВІЗІЙНОЇ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ СЦИНТИЛЯЦІЙНОГО ЕКРАНУ ТА ПЗС-МАТРИЦІ

Виконано порівняння рентгеновських зображень, що формуються цифровою рентгенотелевізійною системою непрямого перетворення типу «сцинтиляційний екран–об’єктив–ПЗС-матриця» з зображеннями, отриманими при моделюванні цієї системи. Універсальність математичної моделі, на якій базується розрахунок зображень, дозволяє на етапі проектування рентгенотелевізійної системи визначити оптимальні режими її роботи. Модель може бути адаптована під конкретну технічну задачу, що дає більш точну оцінку параметрів системи, що проектується. Так само модель можна адаптувати для розрахунку параметрів рентгенотелевізійних систем з детекторами прямого перетворення. Бібліогр. 9, рис. 8.

Ключові слова: неруйнівний контроль, цифрова радіографія, сцинтиляційний екран, рентгенотелевізійна система, рентгеновська трубка, ПЗС-матриця, канавковий еталон чутливості

V. A. TROITSKII¹, S. R. MIKHAYLOV², D. S. SHYLO²

¹ E. O. Paton Electric Welding Institute of the NASU 11 Kazimir Malevich str., Kyiv-150, E-mail: office@paton.kiev.ua

² NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 37 Pobedy avenue, Kyiv-56, 03056. E-mail: fel@kpi.ua

Modelling of X-ray images of digital X-ray-TV system based on scintillation screen and CCD matrix. The X-ray images, formed by digital X-ray-TV system of indirect conversion of “scintillation screen-objective lens - matrix” type were compared with the images received in modelling of this system. Versatile of a mathematical model, that is a basis for images calculation, allows determining working modes at a stage of X-ray-TV

system designing. The model can be adapted for specific technical problem that provides more accurate evaluation of parameters of the system being designed. Also the model can be adapted for calculation of the parameters of X-ray TV-systems with direct conversion detectors. Ref. 9, Figures 8

Keywords: non-destructive testing, digital radiography, scintillation screen, X-ray system, X-ray tube, CCD matrix, grooving sensitivity pattern.

Поступила в редакцию
25.04.2017

ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ДОМ «ПАТОН»

www.patonpublishinghouse.com

Журналы
Труды конференций
Сборники
Книги

ЖУРНАЛЫ



Журнал «Автоматическая сварка», 12 выпусков в год, издается с 1948 г. Тематика: сварка, термическая резка, наплавка, пайка, нанесение защитных покрытий и другие родственные процессы.



Журнал «The Paton Welding Journal», 12 выпусков в год, издается с 2000 г. (полный перевод журнала «Автоматическая сварка» на английский язык).



Журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль», 4 выпуска в год, издается с 1989 г. Тематика: методы и разработки в области технической диагностики и неразрушающего контроля.



Журнал «Современная электрометаллургия», 4 выпуска в год, издается с 1985 г. Тематика: специальные процессы переплава – ЭШТ, ЭЛП, ПДТ, ВДТ, ВИП.

СБОРНИКИ



ТИТАН. ТЕХНОЛОГИИ. ОБОРУДОВАНИЕ. ПРОИЗВОДСТВО. – Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2017. – 254 с. Выпуск четвертый.



ТИТАН. ТЕХНОЛОГИИ. ОБОРУДОВАНИЕ. ПРОИЗВОДСТВО. – Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2014. – 270 с. Выпуск третий.



ТИТАН. ТЕХНОЛОГИИ. ОБОРУДОВАНИЕ. ПРОИЗВОДСТВО. – Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2011. – 324 с. Выпуск второй.



НАПЛАВКА. ТЕХНОЛОГИИ, МАТЕРИАЛЫ, ОБОРУДОВАНИЕ / Составители: И.А. Рябцев, И.А. Кондратьев, Е.Ф. Переплетчиков, Ю.М. Кусков. – Киев: ИЭС им. Е.О. Патона, 2015. – 402 с.



СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ. – Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2014. – 168 с.



СВАРКА И НАПЛАВКА МЕДИ И СПЛАВОВ НА ЕЕ ОСНОВЕ / Составители: В.М. Илюшенко, Е.П. Лукьянченко. – Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2013. – 396 с.



МЕТАЛЛУРГИЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ И СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ / Составители: И.К. Походня, А.С. Котельчук. – Киев: Академперіодика, 2012. – 526 с.



СТЫКОВАЯ СВАРКА ДАВЛЕНИЕМ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ. – Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2011. – 132 с.

ТРУДЫ КОНФЕРЕНЦИЙ



I–VIII Международные конференции «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах» (2002–2016 гг.). (Восемь выпусков).



Труды Международной конференции «Сварочные материалы», 16–18 июня 2014, Киев, ИЭС им. Е. О. Патона; журнал «Автоматическая сварка», № 6–7, 2014. – 204 с.



I–VII Международные конференции «Лазерные технологии в сварке и обработке материалов» (2003–2015 гг.). (Семь выпусков).



Труды Международной конференции «Наплавка. – Наука. Производство. Перспективы», 15–17 июня 2015, Киев, ИЭС им. Е. О. Патона; журнал «Автоматическая сварка», № 5–6, 2015. – 160 с.



Труды Международной конференции «Современные технологии сварки», 13–15 июня 2016, Киев, ИЭС им. Е. О. Патона; журнал «Автоматическая сварка», № 5–6, 2016. – 184 с.



Труды Международной конференции «Роботизация и автоматизация сварочных процессов», 12–14 июня 2017, Киев, ИЭС им. Е. О. Патона; журнал «Автоматическая сварка», № 5–6, 2017. – 120 с.

АНАЛІЗ ВІБРАЦІЙНОГО СИГНАЛУ ПІДШИПНИКОВОГО ВУЗЛА З РОЗВИНУТИМ ДЕФЕКТОМ НА ОСНОВІ МЕТОДІВ СТАТИСТИКИ ПЕРІОДИЧНО КОРЕЛЬОВАНИХ ВИПАДКОВИХ ПРОЦЕСІВ

І. Й. МАЦЬКО

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5. E-mail: matsko.ivan@gmail.com

Проведено аналіз вібрацій підшипникового вузла декантера з розвинутим дефектом на основі їх математичної моделі у вигляді періодично корельованого випадкового процесу. Розглянуто властивості як детермінованої, так і періодично нестационарної стохастичної складових. Встановлено ті особливості спектрально-кореляційної структури останньої, які характеризують дефект даного типу й можуть бути використані для його раннього виявлення. Бібліогр. 10, Рис. 13, табл. 2.

Ключові слова: підшипниковий вузол, вібрації, періодично корельований випадковий процес, розвинутий дефект, характерні ознаки дефекту

Виникнення дефектів в елементах механічних систем спричиняє нелінійні ефекти у властивостях вібраційних коливань. Такі ефекти приводять як до появи нових гармонік у детермінованій складовій вібрації, так і до взаємодії цієї складової зі стохастичними коливаннями, які зумовлені флуктуаціями товщини та в'язкості змазки, змінами сил тертя, спонтанними й некерованими змінами робочих навантажень і т. п. В результаті вказаної взаємодії порушується строга періодичність детермінованих коливань, вони модулюються за фазою та амплітудою. В багатьох випадках характеристики такої модуляції є важливими носіями інформації про стан того чи іншого об'єкту. Відмічені властивості вібрацій можуть бути адекватно описані математичною моделлю у вигляді періодично корельованих випадкових процесів (ПКВП), які представляються сумою модульованих за амплітудою та фазою гармонік з кратними частотами [1, 2]:

$$\xi(t) = \sum_{k \in Z} \xi_k(t) e^{ik\omega_0 t}, \quad (1)$$

де $\xi_k(t)$ – стаціонарно зв'язані випадкові процеси; $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$, T – період нестационарності. Математичне сподівання процесу (1) $m(t) = E\xi_k(t)$, де E – оператор імовірнісного усереднення, та його кореляційна функція $b(t, u) = E\xi_k(t)\xi_k(t+u)$, де $\xi_k(t) = \xi(t) - m(t)$, періодично змінюються за часом t і можуть бути представлені рядами Фур'є:

$$m(t) = \sum_{k \in Z} m_k e^{ik\omega_0 t} = m_0 + \sum_{k \in N} (m_k^c \cos k\omega_0 t + m_k^s \sin k\omega_0 t),$$

$$b(t, u) = \sum_{k \in Z} B_k(u) e^{ik\omega_0 t} = B_0(u) + \sum_{k \in N} (B_k^c(u) \cos k\omega_0 t + B_k^s(u) \sin k\omega_0 t),$$

при цьому

$$m_k = \frac{1}{2}(m_k^c - im_k^s), \quad B_k(u) = \frac{1}{2}(B_k^c(u) - iB_k^s(u))$$

$\forall k \neq 0$, а Z і N є множинами, відповідно, цілих і натуральних чисел. Коефіцієнти Фур'є m_k є математичними сподіваннями модулюючих процесів $m_k = E\xi_k(t)$, а коефіцієнти Фур'є кореляційної функції $B_k(u)$ (їх називають кореляційними компонентами [1, 2]) визначаються формулою

$$B_k(u) = \sum_{l \in Z} R_{l-k, l}(t) e^{il\omega_0 u}, \quad (2)$$

де $R_{lk}(u) = E\xi_l(t)\xi_k(t+u)$, $\xi_l(t) = \xi(t) - m_l$, а « \leftrightarrow » – знак спряження. Як випливає з (2), нульовий кореляційний компонент $B_0(u)$ визначається автокореляційними функціями модулюючих процесів $\xi_k(t)$, а кореляційні компоненти номерів k – взаємкореляційними функціями тих модулюючих процесів, номери котрих відрізняються на число k .

Змінна спектральна густина

$$f(\omega, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} b(t, u) e^{-i\omega u} du$$

також є періодичною функцією і може бути представлена у вигляді ряду Фур'є:

$$f(\omega, t) = \sum_{k \in Z} f_k(\omega) e^{ik\omega_0 t}.$$

Її коефіцієнти Фур'є – спектральні компоненти $f_k(\omega)$, є перетвореннями Фур'є кореляційних компонентів:

$$f_k(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} B_k(u) e^{-i\omega u} du = \sum_{l \in Z} f_{l-k,l}(\omega - l\omega_0).$$

Нульовий кореляційний компонент $B_0(u)$ є кореляційною функцією стаціонарного наближення ПКВП, а нульовий спектральний компонент $f_0(\omega)$ визначає розклад за частотами усередненої за часом потужності коливань. Він є суперпозицією зсунутих по частоті на величину $l\omega_0$ спектральних густин потужності модулюючих процесів.

Періодична функція $m(t)$ та її коефіцієнти Фур'є m_k описують властивості детермінованих вібрацій, а кореляційна функція $b(t, u)$, спектральна густина $f(\omega, t)$, кореляційні компоненти $B_k(u)$ і спектральні компоненти $f_k(\omega)$ – властивості стохастичних коливань. Всі ці величини можуть бути використані при дослідженні стану механізму. При цьому, як показали дослідження [1, 3], за характеристиками періодичної нестаціонарності другого порядку, якими є кореляційні та спектральні компоненти ненульових номерів, можна виявляти дефекти механізмів вже на ранніх стадіях, а також оцінювати ступінь їх розвитку. Інформативними тут є як гармонічні складові величин $b(t, u)$ та $f(\omega, t)$, а також залежності кореляційних компонентів від зсуву та спектральних компонентів від частоти. Наведені вище співвідношення є основою для верифікації ПКВП-моделі, а також інтерпретації обробки експериментальних даних.

Аналіз стаціонарного наближення вібраційного сигналу. В даній роботі проаналізовано вібраційний сигнал, відібраний з підшипникового вузла декантера Flottweg 24E, схематичне зображення якого наведено на рис. 1, за допомогою створеної у ФМІ

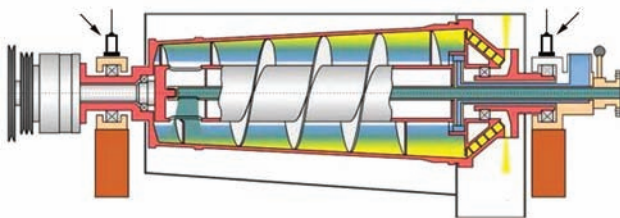


Рис. 1. Механічна схема декантера (стрілками показані місця кріплення акселерометрів)

ім. Г. В. Карпенка НАН України вібродіагностичної системи на одному з підприємств України.

Такий аналіз проводився на основі ПКВП-підходу з використанням всього комплексу імовірнісних характеристик першого й другого порядків. Потужність декантера становить 16 кВт, швидкість обертання валу – 3600 об/хв. Верхня частота пропускання аналогового фільтру – 5 кГц, частота дискретизації $fs_{\text{ampl}}(\omega) = 10$ кГц. Час запису вібраційних сигналів – 20 с. Фрагмент реалізації вібраційного сигналу показаний на рис. 2. На рисунку видно чітко виражені викиди, що слідують один за одним з частотою обертання валу.

На початковому етапі аналізу вяснимо характерні особливості кореляційно-спектральної структури стаціонарного наближення сигналу. Оцінки кореляційної функції стаціонарного наближення обчислимо за формулою:

$$\hat{R}(lh) = \sum_{n=0}^{K-1} [\xi(nh) - \hat{m}] [\xi((n+l)h) - \hat{m}],$$

де $\hat{m} = \frac{1}{K} \sum_{n=0}^{K-1} \xi(nh)$, $K = \frac{\theta}{h}$ – число відліків; θ –

довжина реалізації; h – крок дискретизації; l – ціле число. Графік залежності від зсуву обчисленої оцінки представлений на рис. 3, а.

Як видно, оцінка $\hat{R}(u)$ при малих відхиленнях зсуву u від нуля різко зменшується на величину, що становить біля однієї третини її значення в нулі. Далі вона має вигляд повільно згасаючих коливань, основний період яких є близьким до пе-

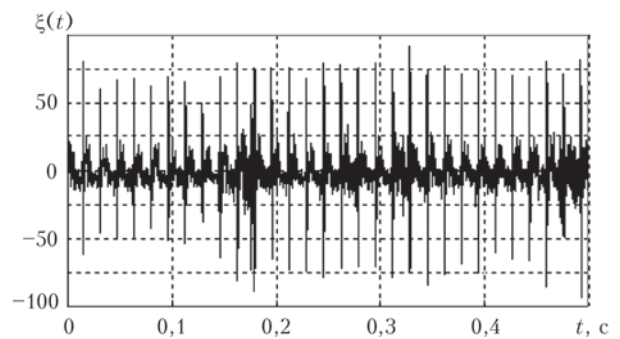


Рис. 2. Фрагмент реалізації вібраційного сигналу

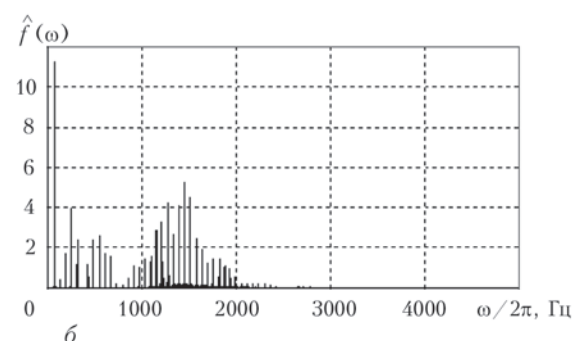
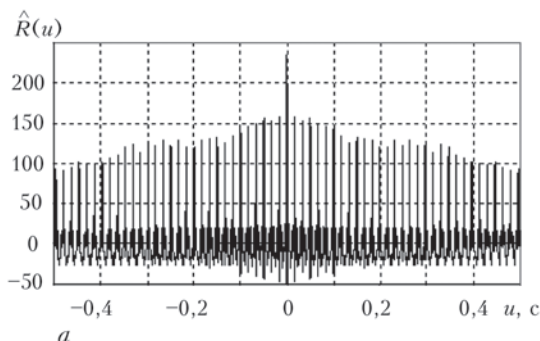


Рис. 3. Оцінки кореляційної функції (а) та спектральної густини потужності (б) стаціонарного наближення вібраційного сигналу

ріоду обертання валу. Для більших зсувів u оцінка $\hat{R}(u)$ приймає вигляд незгасаючих періодичних коливань складної форми.

Оцінку спектральної густини потужності стаціонарного наближення вібраційного сигналу знайдемо, використовуючи корелограмний метод Блекмана–Тьюкі [1, 4]:

$$\hat{f}(\omega) = \frac{\Delta u}{2\pi} \sum_{n=-L}^L R(n\Delta u) k(n\Delta u) e^{-i\omega n\Delta u},$$

де $\Delta u = \frac{u_{\max}}{L}$ – інтервал дискретизації за зсувом; u_{\max} – точка усікання корелограми; L – натуральне число; а $k(u_0)$ – кореляційне вікно, яке задовольняє умови: $k(0) = 1$, $k(-u) = k(u)$. При обчисленні було вибрано вікно Хеммінга:

$$k(u) = \begin{cases} 0,54 + 0,46 \cos \frac{\pi u}{u_{\max}}, & |u| \leq u_{\max} \\ 0, & |u| > u_{\max} \end{cases}$$

Графік отриманої оцінки представлено на рис. 3, б. Він має гребінчатий вигляд. Максимальне значення оцінка приймає на частоті, що відповідає основній частоті обертання валу. Спектральний склад коливань обмежується верхньою частотою, значення якої є трохи меншим від 2,5 кГц. На графіку можна виділити низькочастотну, середню й високочастотну смуги від 1,0 до 2,5 кГц. Коливання, частоти яких належать до останньої смуги, є найбільш потужними.

Виділення й аналіз детермінованих коливань.

Для детальнішого аналізу кореляційно-спектральної структури сигналу використаємо методи статистики ПКВП. Першим етапом при такому підході є розділення вібрацій на детерміновану та стохастичну складові. Для цього застосуємо методи виявлення прихованих періодичностей, які ґрунтуються на їх ПКВП-моделі [1, 5–7]. Найпростішими серед них є когерентний та компонентний методи, при яких використовуються статистики, аналогічні до відповідних оцінок імовірнісних характеристик, тільки з тією різницею, що в них замість істинного значення періоду використовується деяка пробна величина τ . Такі статистики є селективними по відношенню до періоду нестационарності, а саме, вони приймають екстремальні значення в точках, які є близькими до значення періоду. Тому задача визначення періоду зводиться до пошуку точок екстремумів відповідних функціоналів. При когерентному оцінюванні, що є узагальненням на випадок ПКВП широко відомої схеми Бью-Балло, виявляються всі можливі гармоніки, частоти яких є кратними до основної, а при компонентному – тільки вибрана з них. В даному випадку, оскільки оцінка спектральної густини потужності має вигляд гребінки, застосуємо когерентний

метод, при якому статистика для визначення періоду математичного сподівання має вигляд [1, 7]:

$$\hat{m}(t, \tau) = \frac{1}{2N+1} \sum_{n=-N}^N \xi(t+n\tau), \quad (3)$$

де τ – пробний період. Оскільки дискретні значення вібраційного сигналу отримані з кроком $h = 10^{-4}$ с, то й величини t і τ можна також змінювати з таким же кроком. Для точнішого визначення періоду проведемо передискретизацію даних, використовуючи формулу Котельнікова–Шеннона:

$$\xi(t) = \sum_{n=-M}^M \xi(nh) \frac{\sin \omega_{\max}(t-nh)}{\omega_{\max}(t-nh)},$$

де ω_{\max} – максимальна частота сигналу.

Час t виберемо близьким до точки максимуму статистики $\hat{m}(t, \tau)$. Залежність $\hat{m}(t, \tau)$ від пробного періоду τ для такого t показана на рис. 4. Максимальне значення ця величина приймає при $\tau = 1,6667 \cdot 10^{-2}$ с. Це значення приймемо за оцінку періоду математичного сподівання $\hat{m}(t, \hat{T})$. Йому відповідає частота $\hat{f} = 59,998$ Гц. При такому $\tau = \hat{T}$ величина (3) є оцінкою математичного сподівання $\hat{m}(t, \hat{T})$, яке описує детерміновану складову сигналу. Залежність від часу цієї складової, як видно з рис. 5, характеризується потужними викидами, які повторюються через період обертання валу. На основі значень $\hat{m}(t, \hat{T})$ на періоді $[0, \hat{T}]$ знайдемо амплітудний спектр детерміновано складової

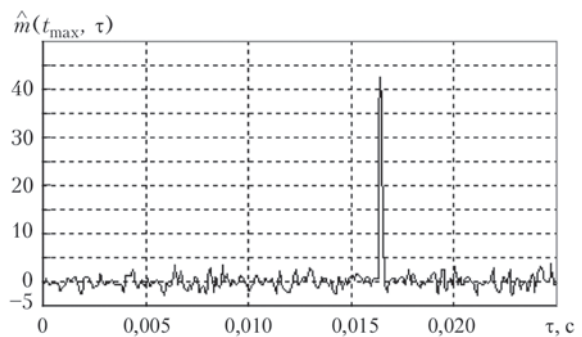


Рис. 4. Залежність статистики $\hat{m}(t_{\max}, \tau)$ від пробного періоду τ

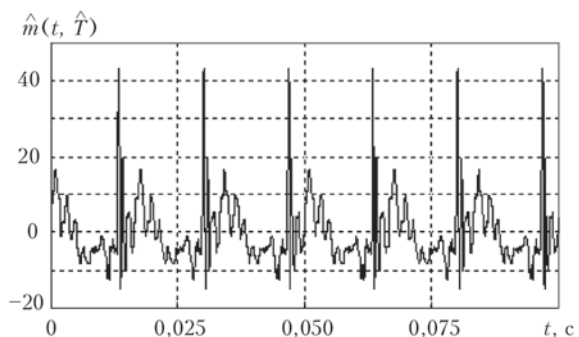


Рис. 5. Залежність статистики $\hat{m}(t_{\max}, \tau)$ від пробного періоду τ

вібраційного сигналу. Оцінки амплітуд гармонік $|\hat{m}_k|$ обчислимо, використовуючи формули [8–10]:

$$\left\{ \begin{matrix} \hat{m}_k^c \\ \hat{m}_k^s \end{matrix} \right\} = \frac{2}{L+1} \sum_{n=0}^L \hat{m}(n\tilde{h}, \hat{T}) \left\{ \begin{matrix} \cos k \frac{2\pi}{L+1} n \\ \sin k \frac{2\pi}{L+1} n \end{matrix} \right\},$$

$$|\hat{m}_k| = \sqrt{(\hat{m}_k^c)^2 + (\hat{m}_k^s)^2},$$

при цьому $\tilde{h} = \frac{\hat{T}}{L+1}$. Значення оцінок амплітуд гармонік подані у табл. 1, а на рис. 6 показана діаграма, яка є графічним представленням амплітудного спектру.

Слід відмітити, що перед обробкою вібраційний сигнал центрований на постійну складову, тому нульовий компонент математичного сподівання сигналу $\hat{m}_0 = 0$. Цей спектр є досить широким, значущим є біля 40 гармонік, що відповідає ширині спектру біля 2,5 кГц.

Потужність детермінованої складової $P_{det} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{40} |\hat{m}_k|^2 = 69,79$. Сумарну потужність детермінованої та стохастичної складових сигналу можна оцінити за значенням в нулі оцінки кореляційної функції стаціонарного наближення, яке дорівнює $\hat{R}(0) = 234,27$. Отже відношення потужностей детермінованої та стохастичних складових вібрації складає $\frac{P_{det}}{P_{st}} = 0,424$. Форма амплітудного спектру детермінованих коливань є подібною до

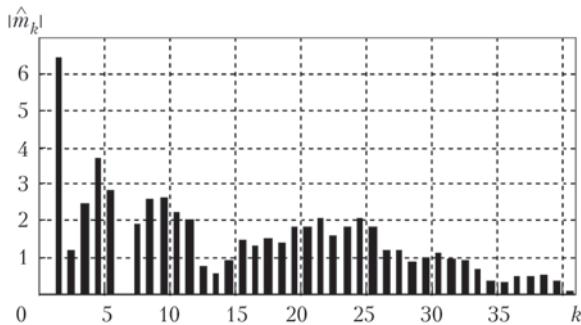
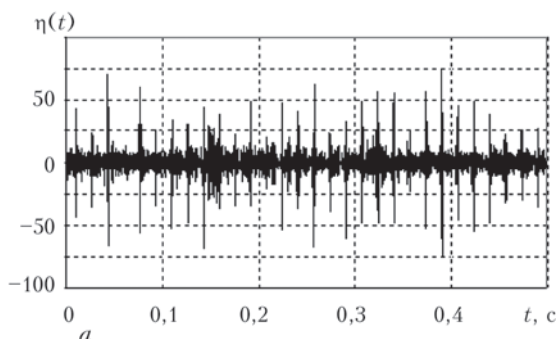


Рис. 6. Амплітудний спектр детермінованої складової вібраційного сигналу



форми оцінки спектральної густини стаціонарного наближення. Виразно виділяються ті ж характерні частотні смуги, близькими є точки максимальних і мінімальних значень. Однак судити про якісь числові співвідношення наразі неможливо, оскільки значення оцінки спектральної густини стаціонарного наближення сигналу, який містить детерміновану і стохастичну складові, залежать від довжини відрізка реалізації і ростуть, коли остання збільшується. Дослідити кореляційно-спектральні властивості стохастичної складової можна тільки провівши її окремий аналіз, використовуючи при цьому методи статистики ПКВП.

Кореляційно-спектральний аналіз структури стохастичних коливань. Графік стохастичного залишку $\eta(t)$, який отриманий центруванням початкової реалізації на оцінку математичного сподівання, тобто $\eta(t) = \xi(t) - \hat{m}(t, \hat{T})$, показаний на рис. 7, а. Флуктуаційні вібраційні коливання, як видно, також містять потужні викиди з випадково змінною амплітудою. Оцінка кореляційної функції, обчислена тепер за формулою

$$R_\eta(rh) = \frac{1}{K} \sum_{n=0}^{K-1} \eta(nh) \eta((n+r)h),$$

де $\eta(nh) = \xi(nh) - \hat{m}(nh, \hat{T})$, графічно представлена на рис. 7, б. Вона має вигляд повільно загасаючих груп коливань. Такі групи слідує одна за одною з інтервалом, який є близьким до періоду обертання валу. Оскільки оцінка кореляційної функції згасає до малопотужних біля нуля флуктуацій, то можна зробити висновок про те, що отриманий залишок не містить жодних детермінованих коливань.

Графік корелограмної оцінки спектральної густини обчислений на основі першої групи коливань (рис. 8, а), коли точка усічення корелограми $u_{max} = 0,002$ с, має одновершинну форму з максимальним значенням на $f = 1485$ Гц (рис. 8, б). Ширина значущої смуги від 1,0 до 2,5 кГц. Оцінка спектральної густини, обчислена за кількома групами коливань кореляційної функції при $u_{max} = 0,025$ с (рис. 9, а) має вже форму гребінки, відстань між вершинами котрої є близькою до частоти обертання валу (рис. 9, б).

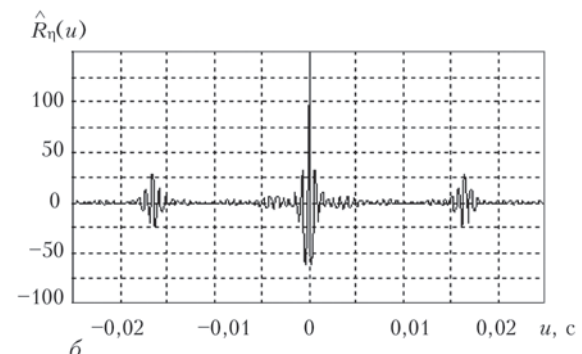


Рис. 7. Стохастична складова вібраційного сигналу (а) та оцінка її кореляційної функції в стаціонарному наближенні (б)

Таблиця 1. Значення оцінок амплітуд гармонік детермінованої складової вібраційного сигналу

k	$ \hat{m}_k $	k	$ \hat{m}_k $	k	$ \hat{m}_k $	k	$ \hat{m}_k $
1	6,4174	11	2,0120	21	2,0879	31	0,9436
2	1,1710	12	0,7284	22	1,5739	32	0,9209
3	2,4556	13	0,5638	23	1,8055	33	0,6692
4	3,6817	14	0,9110	24	2,0787	34	0,3590
5	2,8134	15	1,4680	25	1,8074	35	0,3397
6	0,0138	16	1,3112	26	1,2148	36	0,4736
7	1,9002	17	1,5010	27	1,1875	37	0,4538
8	2,5923	18	1,4195	28	0,8542	38	0,5343
9	2,6074	19	1,8182	29	1,0066	39	0,3792
10	2,2209	20	1,8550	30	1,1177	40	0,0792

Оцінки $\hat{R}_\eta(u)$ і $\hat{f}_\eta(\omega)$ описують властивості стаціонарного наближення стохастичної складової вібрації, тобто є її середньочасовими характеристиками. Щоб встановити закономірності часової мінливості її кореляційно-спектральної структури, використаємо методи статистики ПКВП. Перш за все проведемо пошук прихованих періодичностей у часових змінах кореляційних властивостей. Для цього використаємо симетричне когерентне усереднення кореляційного добутку [1, 5, 7]:

$$\hat{b}(t, u, \tau) = \frac{1}{2N+1} \sum_{n=-N}^N \eta(t+n\tau)\eta(t+u+n\tau). \quad (4)$$

Така статистика при $\hat{b}_t(t, u, \tau) \neq 0$ приймає екстремальні значення для тих τ , які є близькими до періоду нестационарності T , якщо аналізовані дані є реалізацією ПКВП-сигналу. Найчіткіше такі ек-

тремуни проявляються для тих моментів часу, які є близькими до екстремумів кореляційної функції ПКВП. Графік залежності статистики (4) від пробного періоду τ при $u = 0$ для моменту часу t , що є близьким до максимального значення оцінки, показано на рис. 10. Як видно, статистика (4) приймає чітко виражене пікове значення, яке набагато перевищує рівень флуктуаційних змін. Точка екстремуму є близькою до періоду обертання валу. Більш точні обчислення показують, що вона відрізняється від оцінки періоду математичного сподівання тільки сьомим знаком. Тому й в цьому випадку прийемо $\hat{T} = 1,6667 \cdot 10^{-2}$ с. Обчислена при такому значенні періоду нестационарності оцінка дисперсії $\hat{b}_\eta(t, 0, \hat{T})$ в залежності від часу показана на рис. 11, а. Графік оцінки дисперсії має на періоді обертання валу потужний вузький пік, амплітудне

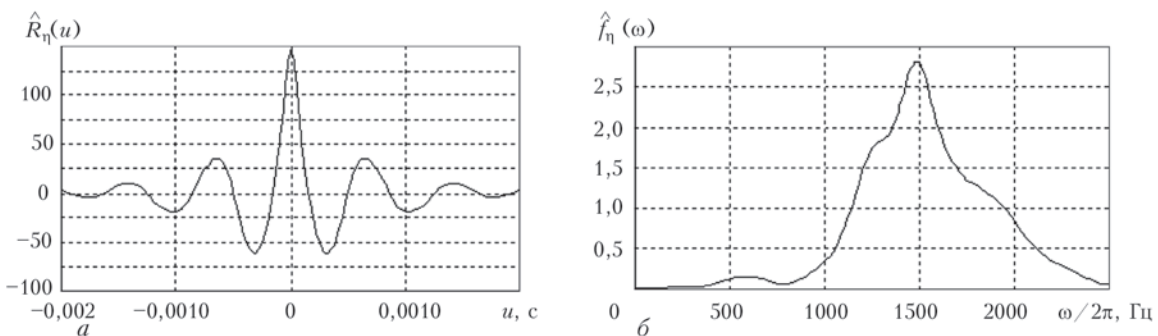


Рис. 8. Оцінка кореляційної функції при $u_{max} = 0,002$ с (а) та відповідна корелограмна оцінка спектральної густини (б)

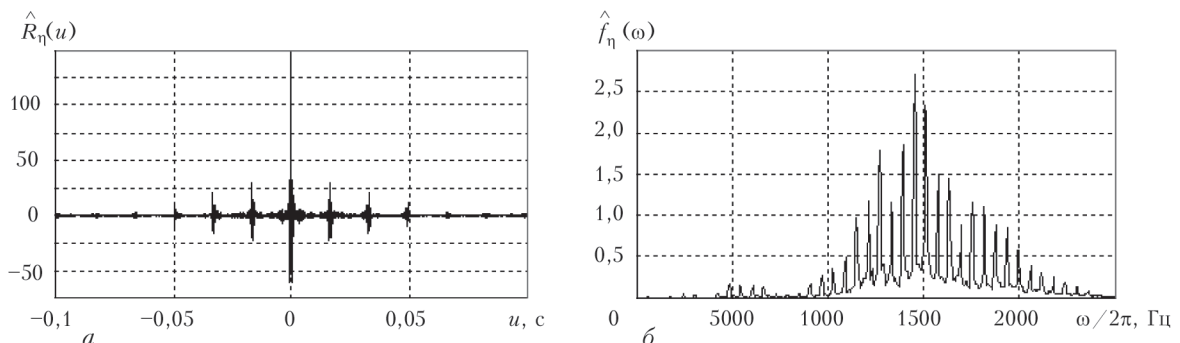


Рис. 9. Оцінка кореляційної функції при $u_{max} = 0,025$ с (а) та відповідна корелограмна оцінка спектральної густини (б)

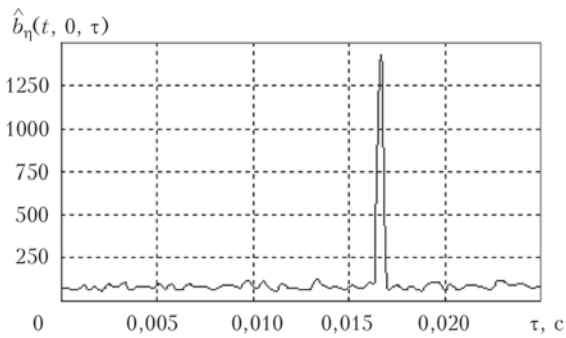


Рис. 10. Залежність статистики $\hat{b}_n(t, 0, \tau)$ від пробного періоду τ

значення якого більше, ніж у тисячу разів перевищує рівень інших часових змін.

Оцінки коефіцієнтів Фур'є дисперсії обчислимо за формулами [8–10]

$$\hat{B}_0(u) = \frac{1}{K} \sum_{n=0}^{K-1} \eta(nh)\eta(nh+u),$$

$$\begin{cases} \hat{B}_k^c(u) \\ \hat{B}_k^s(u) \end{cases} = \frac{1}{K} \sum_{n=0}^{K-1} \eta(nh)\eta(nh+u) \begin{cases} \cos k \frac{2\pi}{L+1} n \\ \sin k \frac{2\pi}{L+1} n \end{cases},$$

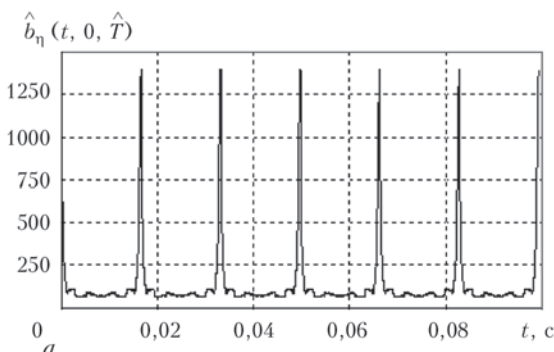
$$|\hat{B}_k(u)| = \sqrt{(\hat{B}_k^c(u))^2 + (\hat{B}_k^s(u))^2}, \quad (5)$$

поклавши $u = 0$. Результати обчислень представлені у табл. 2, а відповідна діаграма, яка є графічним представленням амплітудного спектру оцінки дисперсії – на рис. 11, б.

Амплітудний спектр оцінки дисперсії, як бачимо, є вужчим, ніж спектр математичного сподівання

Таблиця 2. Оцінки коефіцієнтів Фур'є дисперсії стохастичної складової вібрації

k	$ \hat{B}_k(0) $	k	$ \hat{B}_k(0) $	k	$ \hat{B}_k(0) $	k	$ \hat{B}_k(0) $
0	146,6734	6	95,1566	12	43,4736	18	17,9791
1	131,2848	7	85,9749	13	36,9806	19	15,4493
2	123,5196	8	76,6107	14	31,8838	20	12,6662
3	115,0076	9	65,0411	15	25,8956	21	10,6518
4	97,65608	10	54,31635	16	20,1373	22	8,4885
5	96,4492	11	47,4344	17	17,9445	23	6,7359



ня. Значущими є біля 25 компонент. Їх амплітуди монотонно спадають зі збільшенням номера k . Обчислене на основі наведених в табл. 2 даних відношення $I = \sum_{k=1}^{24} |\hat{B}_k(0)| / \hat{B}_0(0)$ дорівнює $I = 8,5166$.

Таке відношення є мірою нестационарності сигналу і використовується для оцінки ступеня розвитку дефекту. Результат обчислень в даному випадку свідчить про потужну стохастичну модуляцію гармонік сигналу. Приймаючи до уваги цей результат, а також значну ширину амплітудних спектрів як детермінованих вібрацій, так і періодичних змін потужності стохастичних коливань, які описуються дисперсією сигналу, приходимо до висновку, що дефект підшипникового вузла є локалізованим і у великій мірі розвинутим.

Для детального аналізу структури стохастичних коливань розглянемо залежності оцінок кореляційних компонентів, обчислених за формулами (5), від зсуву. Графіки таких залежностей оцінок перших п'яти кореляційних компонентів показані на рис. 12. Оцінка нульового кореляційного компонента в даному випадку співпадає з оцінкою кореляційної функції стаціонарного наближення стохастичної складової вібраційного сигналу, вона представлена на рис. 7–9. Як видно, форма графіків для оцінок різних кореляційних компонентів є подібною. Всі вони мають групову структуру. Інтервали між окремими групами, потужності яких загасають з ростом зсуву, є близькими до періоду обертання валу. Періоди згасаючих коливань в кожній групі відрізняються незначно і є близькими до величини, що в двадцять раз менша від періоду обертання валу. Подібну структуру мають і оцінки вищих кореляційних компонентів.

Властивості стохастичної складової в частотній області описують спектральні компоненти, оцінки яких обчислимо, використовуючи корелограмний метод:

$$\hat{f}_0(\omega) = \frac{\Delta u}{2\pi} \sum_{n=-L}^L \hat{B}_0(n\Delta u) k(n\Delta u) e^{-i\omega n\Delta u},$$

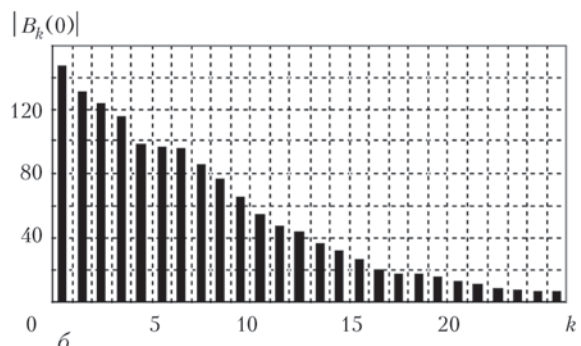


Рис. 11. Оцінка дисперсії (а) стохастичної складової вібрації та її коефіцієнти Фур'є (б)

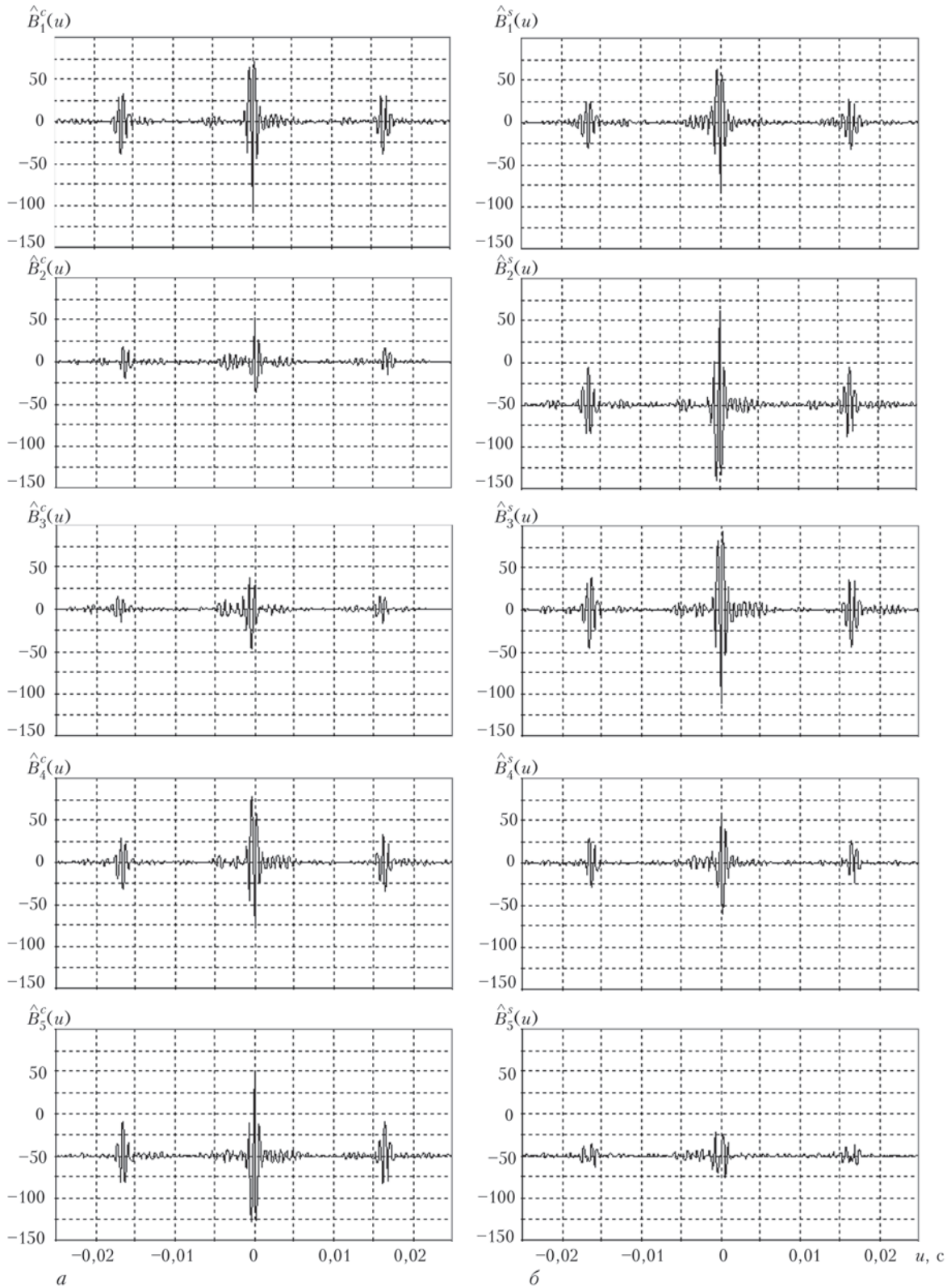


Рис. 12. Оцінки залежностей кореляційних компонентів від зсуву u

$$\hat{f}_k(\omega) = \frac{\Delta u}{2\pi} \sum_{n=-L}^L \hat{B}_k(n\Delta u) k(n\Delta u) e^{-i\omega n\Delta u}$$

Графіки дійсної та уявної частин перших п'яти спектральних компонентів наведені на рис. 13, а графік нульової – на рис. 8, 9 (оцінка цієї величини у даному випадку співпадає з оцінкою спек-

тральної густини стаціонарного наближення стохастичної складової вібраційного сигналу). Як видно, графіки частотної залежності всіх спектральних компонентів мають подібну гребінчасту форму. Відстань між вершинами окремих сусідніх піків дорівнює частоті обертання валу, а значущими всі оцінки є в межах від 1,0 до 2,5 кГц.

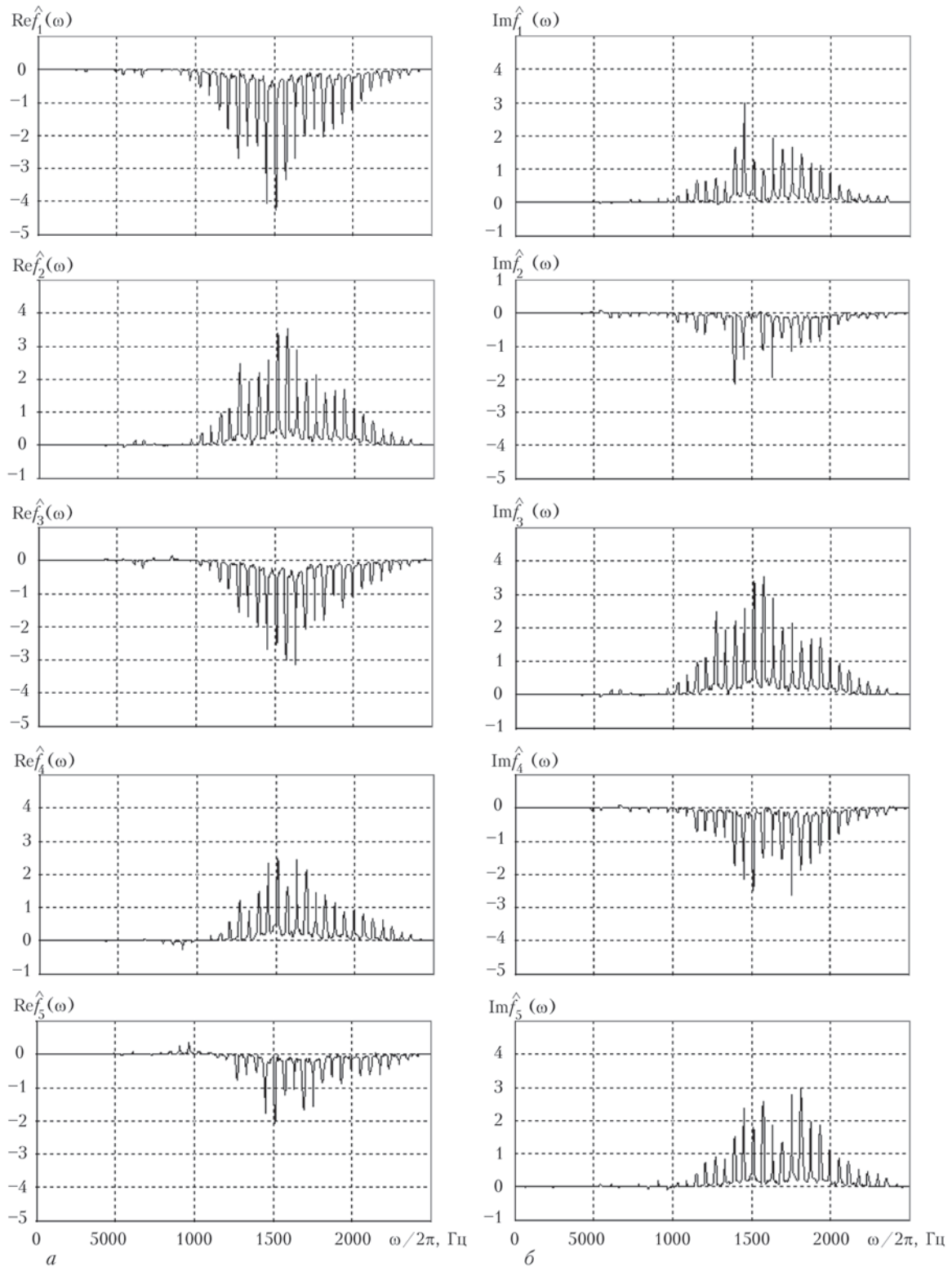


Рис. 13. Оцінки дійсної $Re \hat{f}_k(\omega)$ та уявної $Im \hat{f}_k(\omega)$ частин спектральних компонентів

Виявлена структура кореляційних і спектральних компонентів може бути пояснена, виходячи з властивостей стаціонарно зв'язаних випадкових процесів, які модулюють гармоніки детермінованої складової (1). Ненульові значення оцінки кореляційного компонента певного номера k означають, що корельованими між собою є випадкові процеси,

номери яких відрізняються на число k . Нульовий кореляційний компонент, як випливає з формули

$$B_0(u) = \sum_{l=-2N_1}^{2N_1} R_l(u) e^{il\omega_0 u},$$

де N_1 – число гармонік, виявлених у детермінованій складовій, визначається автокореляційними

функціями модулюючих процесів, а його значення в нулі – сумою їх дисперсій. Автокореляційними функціями цих процесів, як впливає із залежності оцінки нульового кореляційного компонента від зсуву, зникають до рівня малопотужних флуктуацій на інтервалі, значення якого є близьким до п’яти періодів обертання валу. А це означає, що модульовані за амплітудою і фазою гармоніки є вузькосмуговими випадковими процесами. Нульовий спектральний компонент є сумою перенесених спектрів цих процесів

$$f_0(\omega) = \sum_{l=-2N_1}^{2N_1} f_{ll}(\omega - l\omega_0).$$

Оскільки частотна смуга оцінки нульового спектрального компонента визначається інтервалом 1,0...2,5 кГц, в якому має вигляд гребінки (рис. 8, 9), то можемо зробити висновок про те, що потужність стохастичних модуляцій високочастотних гармонік ($k > 13$) значно перевищує потужність нижчих.

Оцінка нульового спектрального компонента визначає спектральний склад флуктуаційних коливань. Найбільш потужними в цьому спектрі є гармоніки, частота яких змінюється в межах від 22 ... 28 ω_0 . Корельованими в цьому спектрі є гармоніки, віддалені одна від одної на відстань $l\omega_0$, при цьому $l = 1, 20$. Як впливає з властивостей оцінок вищих кореляційних і спектральних компонентів, взаємокореляційні зв’язки між модульціями згасають повільно, а взаємоспектральні густини є вузькосмуговими. Вищі спектральні компоненти є сумами спектральних густин зсунутих на $l\omega_0$, тому і мають вигляд гребінки.

Відтак, стохастична складова вібрації може бути представлена у вигляді суперпозиції високочастотних вузькосмугових процесів, у яких частоти несучих котрих є близькими. Така суперпозиція проявляється в груповій структурі залежностей кореляційних компонентів від зсуву, а також в гребінчастій формі частотних залежностей спектральних компонентів.

Характерною особливістю оцінок спектральних характеристик є відсутність гармонік з частотами тіл обертання по зовнішньому та внутрішньому кільцях підшипника. Це дає можливість зробити висновок про те, що розвинутий локальний дефект є дефектом обертання вала. Як вже підкреслювалось, величини, що характеризують міри нестационарності як першого, так і другого порядків, є значними і вказують на те, що обертовий вузол декантера знаходиться у передаварійному стані, що й було підтверджено під час проведення ремонтних робіт.

Висновки

На основі аналізу вібрацій підшипникового вузла декантера методами ПКВП виявлено та опи-

сано його значне пошкодження, яке має ударний характер. Таке пошкодження виразно відображається як у гармонічному складі детермінованих періодичних коливань, так і в кореляційно-спектральній структурі стохастичної складової. Детерміновані коливання мають значну потужність, а їх амплітудний спектр є досить широким – значущими є біля 40 гармонік. Широким спектром характеризуються також періодичні зміни потужності стохастичної складової. Показники нестационарності як першого, так і другого порядків вказують на присутність розвинутого локального дефекту підшипникового вузла. Стохастичні вібраційні коливання можуть бути представлені у вигляді суперпозиції високочастотних гармонік, промодульованих за амплітудою та фазою вузькосмуговими стаціонарними випадковими процесами. Залежності від зсуву кореляційних характеристик таких коливань мають групову структуру, а спектральні мають вигляд гребінки, відстань між вершинами сусідніх піків якої дорівнює частоті обертання валу, і зосереджені в смузі частот 1,0...2,5 кГц. Встановлені особливості кореляційно-спектральної структури стохастичних коливань дали змогу зробити висновок про значне локальне пошкодження валу механізму. Такі результати можуть бути використані в подальшому як для раннього виявлення дефектів механізмів, так і встановлення їх типів.

Список литературы

1. Яворський І. М. (2013) *Математичні моделі та аналіз стохастичних коливань*. Львів, ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України.
2. Javors'ky I. j, Leskow J., Kravets I. et al. (2011) Linear filtration methods for statistical analysis of periodically correlated random processes. Part II: Harmonic series representation. *Signal Processing*, **91**, 2506–2519.
3. Javors'kyj I., Kravets I., Matsko I., Yuzefovych R. (2017) Periodically correlated random processes: application in early diagnostics of mechanical systems. *Mechanical system and signal processing*, **83**, 406–438.
4. Kay S. M. (1988) *Modern spectral estimation*. New Jersey, Eaglewood Cliffs.
5. Javors'kyj I., Mychajlyshyn V. (1996) Probabilistic models and investigation of hidden periodicities. *Applied mathematical letters*, **9**, 21–23.
6. Javors'kyj I., Dehay D., Kravets I. (2014) Component statistical analysis of second order hidden periodicities. *Digital signal processing*, **26**, 50–70.
7. Javors'kyj I., Matsko I., Yuzefovych R. et al. (2017) Coherent covariance analysis of periodically correlated random processes for unknown non-stationary period. *ibid*, **65**, 27–51.
8. Javors'kyj I., Isayev I., Majewski J., Yuzefovych R. (2010) Component covariance analysis of periodically correlated random processes. *Signal processing*, **90**, 1083–1102.
9. Javors'kyj I., Kravets I., Isayev I., Gajacka E. (2012) Linear filtration methods for statistical analysis of periodically correlated random processes. Part I: Coherent and component methods and their generalizations. *ibid*, **92**, 1559–1566.
10. Javors'kyj I., Matsko I., Yuzefovych R., Zakrzewski Z. (2016) Discrete estimators for periodically correlated random processes. *Digital signal processing*, **53**, 25–40.

References

1. Yavorskyi I. M. (2013) *Matematychni modeli ta analiz stokhastychnykh kolyvan*. Lviv, FMI im. H.V. Karpenka NAN Ukrainy. [in Ukrainian]
2. Javors'ky I., Leskow J., Kravets I. et al. (2011) Linear filtration methods for statistical analysis of periodically correlated random processes. Part II: Harmonic series representation. *Signal Processing*, **91**, 2506–2519.
3. Javors'kyj I., Kravets I., Matsko I., Yuzefovych R. (2017) Periodically correlated random processes: application in early diagnostics of mechanical systems. *Mechanical system and signal processing*, **83**, 406–438.
4. Kay S. M. (1988) *Modern spectral estimation*. New Jersey, Eaglewood Cliffs.
5. Javors'kyj I., Mychajlyshyn V. (1996) Probabilistic models and investigation of hidden periodicities. *Applied mathematical letters*, **9**, 21–23.
6. Javors'kyj I., Dehay D., Kravets I. (2014) Component statistical analysis of second order hidden periodicities. *Digital signal processing*, **26**, 50–70.
7. Javors'kyj I., Matsko I., Yuzefovych R. et al. (2017) Coherent covariance analysis of periodically correlated random processes for unknown non-stationary period. *ibid*, **65**, 27–51.
8. Javors'kyj I., Isayev I., Majewski J., Yuzefovych R. (2010) Component covariance analysis of periodically correlated random processes. *Signal processing*, **90**, 1083–1102.
9. Javors'kyj I., Kravets I., Isayev I., Gajecka E. (2012) Linear filtration methods for statistical analysis of periodically correlated random processes. Part I: Coherent and component methods and their generalizations. *ibid*, **92**, 1559–1566.
10. Javors'kyj I., Matsko I., Yuzefovych R., Zakrzewski Z. (2016) Discrete estimators for periodically correlated random processes. *Digital signal processing*, **53**, 25–40.

И. Й. МАЦЬКО

Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко НАН Украины, 79060, г. Львов, ул. Научная, 5.
E-mail: matsko.ivan@gmail.com

АНАЛИЗ ВИБРАЦИОННОГО СИГНАЛА ПОДШИПНИКОВОГО УЗЛА С РАЗВИТЫМ ДЕФЕКТОМ НА ОСНОВАНИИ

МЕТОДОВ СТАТИСТИКИ ПЕРИОДИЧЕСКИ КОРРЕЛИРОВАННЫХ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ

Проведен анализ вибраций подшипникового узла декантера с развитым дефектом на основании их математической модели в виде периодически коррелированного случайного процесса. Рассмотрены свойства как детерминированной, так и периодически нестационарной стохастической составляющих. Определены те особенности спектрально-корреляционной структуры последней, которые характеризуют дефект данного типа и могут быть использованы для его раннего выявления. *Бібліогр.* 10, Рис. 13, табл. 2.

Ключевые слова: подшипниковый узел, вибрации, периодически коррелированный случайный процесс, развитый дефект, характерные признаки дефекту

I. Y. MATSKO

Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine. 5 Naukova str., Lviv, 79060, E-mail: matsko.ivan@gmail.com

ANALYSIS OF VIBRATION SIGNAL OF BEARING UNIT WITH DEVELOPED DEFECT BASED ON METHODS OF STATISTICS OF PERIODICALLY CORRELATED RANDOM PROCESSES

Vibrations of bearing unit decanter with developed defect based on their mathematical model in form of periodically correlated random process were analyzed. Considered were the properties of deterministic as well as periodically nonstationary stochastic constituents. The peculiarities of spectrum-correlation structure of the latter, which characterize defect of this type and can be used for its early detection, were determined. *Ref.10, Figures 13, Tables 2.*

Keywords: bearing unit, vibration, periodically correlated random process, developed defect, typical defect characteristics

Надійшла до редакції
13.04.2017

Международная конференция

«Титан 2018: производство, обработка, применение»

11–12 июня 2018 г., Киев, ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины

Тематика конференции

- прогрессивные технологии и оборудование для получения титана и сплавов на его основе;
- деформационная обработка титана;
- новые сплавы на основе титана и его интерметаллидных соединений;
- особенности структуры и термической обработки титановых сплавов;
- аддитивные и порошковые технологии в производстве изделий из титановых сплавов;
- прогрессивные технологии сварки и пайки изделий и конструкций из титановых сплавов;
- применение изделий и конструкций из титановых сплавов в авиадвигателестроении и других отраслях промышленности.

Организационный комитет конференции ТИТАН 2018

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины 03680, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11

Тел./факс: (38044) 200-82-77; E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.pwi-scientists.com/rus/titan_2018

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ SMART GRID В СИСТЕМАХ МОНИТОРИНГА И ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

А. А. ЗАПОРОЖЕЦ, А. Д. СВЕРДЛОВА

Институт технической теплофизики НАН Украины. 03057, г. Киев-57, ул. Желябова, 2а. E-mail: lektron2007@gmail.com

Рассмотрены возможности использования «умных сетей» в системах мониторинга и диагностики теплоэнергетического оборудования. Проанализированы причины неисправностей и аварийных ситуаций оборудования генерации, транспортировки и потребления тепловой энергии. Рассмотрены основные методы неразрушающего контроля, применимые для диагностики технических узлов, и информативные сигналы, которые возникают в процессе эксплуатации энергетического оборудования. Предложены структуры функционирования теплоэнергетического оборудования для применения технологии Smart Grid в системах мониторинга и диагностирования соответствующих иерархических уровней. Исследованы основные преимущества энергетических сетей на базе технологии Smart Grid перед традиционными сетями. Разработана структура многоуровневой системы диагностики теплоэнергетического оборудования с возможностью использования проводных и беспроводных каналов передачи информации. Библиогр. 17, табл. 4, рис. 5.

Ключевые слова: система диагностики, теплоэнергетическое оборудование, неразрушающий контроль, технология Smart Grid

Одна из главных задач теплоэнергетики заключается в обеспечении промышленности и коммунального хозяйства тепловой энергией [1].

При эксплуатации теплоэнергетических установок и систем должны быть обеспечены надежность, долговечность и безопасность как системы в целом, так и оборудования, входящего в систему. Эксплуатационная надежность любого оборудования заключается в выполнении им заданных функций и сохранении во времени значений установленных технической документацией эксплуатационных показателей в допустимых пределах, соответствующих заданным режимам. Таким образом, актуальной задачей является разработка системы диагностирования объектов теплоэнергетики для раннего выявления и устранения возникающих дефектов, что позволит повысить надежность функционирующего оборудования.

Анализ литературных данных и постановка проблемы. В связи с уменьшением запасов ископаемого топлива, а также с необходимостью повышения эффективности его использования, мониторинг состояния теплоэнергетического оборудования является важной задачей. В работе [2] проведен анализ существующих методов и способов диагностирования систем электроснабжения, определены основные преимущества и недостатки существующих методов. В работе [3] представлены основные подходы к мониторингу и диагностике технического состояния машинных агрегатов энергетического оборудования по параметрам вибрационных процессов. Основные типы дефектов, возникающих при эксплуатации теплоэнергетического оборудования, описаны в

работах [4, 5]. В работах [6–10] приведены средства контроля и методы повышения эффективности процесса сжигания топлива в котлоагрегатах. Значительное внимание уделяется методам инфракрасной диагностики теплоэнергетического оборудования [11, 12]. Актуальны разработки систем диагностирования технического состояния трансформаторного оборудования высокого напряжения [13]. Проводятся интенсивные поиски различных подходов и методов реализации информационных технологий, в т. ч. использования мощных технических комплексов, включая технологии Smart Grid [14].

Таким образом, актуальной в теплоэнергетике является проблема разработки систем диагностирования, основанных на концепции «умных сетей» с возможностью применения подходов, инструментов и методов обработки структурированных и неструктурированных данных.

Цель и задачи исследования. Проведены исследования с целью установить основные структурные подходы к диагностированию теплоэнергетического оборудования с применением концепции «умных сетей» Smart Grid в процессах генерации, транспортировки и потребления тепловой энергии.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

- исследовать причины отказов теплоэнергетического оборудования, основные методы технической диагностики (ТД) и распознавания состояния оборудования;
- разработать иерархическую организацию системы диагностируемого теплоэнергетического оборудования;

Таблица 1. Объекты, параметры и их характеристики при тепловом контроле

Объект контроля	Параметры и характеристики
Теплогенерирующие установки и агрегаты	Теплота сжигания топлива Тепловые потери через обмуровку Тепловая нагрузка поверхностей топочных экранов котлоагрегата
Теплопроводы	Локальные тепловые потери теплопроводов Теплопотери магистральных участков теплосетей Количество теплоты Тепловое сопротивление теплоизоляции и целостность трубопроводов Влажность теплоизоляционных материалов Температура
Строения	Тепловой поток Температура Тепловые потери через ограждающие конструкции зданий (стены, окна, двери, потолки, пол) Тепловое сопротивление строительных конструкций Терморadiационные характеристики стекла Тепловое сопротивление стеклопакетов Теплопроводность строительных и других материалов

– разработать структуру системы диагностирования теплоэнергетического оборудования, базирующейся на использовании концепции умных сетей Smart Grid.

Результаты исследования. Техническое состояние каждого объекта характеризуют различные физические величины – механические, гидромеханические, аэромеханические, термодинамические, электрические, электромагнитные, оптические, акустические и др., анализ которых позволяет обосновать множество диагностических параметров. Использование методов неразрушающего контроля (НК) позволяет получить значение диагностических параметров для определения технического состояния оборудования без его демонтажа. Основным критерием отбора тех или иных физических величин как диагностических параметров при изучении физических полей и явлений, которые максимально чувствительны к изменению

состояния материала, условий погрузки, эксплуатации и др., является возможность определения физических параметров без разрушения образцов.

На каждом этапе мониторинга объектов обязательным является определение тепловых нагрузок поверхностей нагрева, исследование процессов сжигания топлива в топках котлоагрегатов, тепловых потерь в ограждающих конструкциях и трубопроводах тепловых сетей (табл. 1), т. е. тепловой контроль теплогенерирующих установок, агрегатов, теплопроводов, ограждающих конструкций.

В то же время обслуживание оборудования по фактическому техническому состоянию базируется на применении ряда методов технической диагностики и распознавания технических состояний, которые при совместном использовании могут определить большую часть разных дефектов, возникающих в теплоэнергетическом оборудовании. В табл. 2 представлены наиболее распространенные

Таблица 2. Методы и объекты диагностики теплоэнергетического оборудования

Метод	Оборудование
Акустико-эмиссионная диагностика	Сосуды, работающие под давлением, резервуары, трубопроводы, несущие конструкции
Трибодиагностика (анализ качества смазки и выявление частиц износа)	Энергомеханическое оборудование, в том числе низкооборотное, трансформаторы
Вибродиагностика и вибромониторинг	Энергомеханическое оборудование с движущимися деталями
Тепловидение и термография	Электроэнергетическое оборудование, теплообменное оборудование, теплоизоляция, печи, котлы и др.
Аэроультразвуковой контроль утечек (вакуумные утечки)	Компрессионное оборудование
Анализ токов и электроимпульсное тестирование	Токопроводящая часть, изоляция, эксцентриситет
Ультразвуковая дефектоскопия	Состояние и толщина стенок трубопроводов, сосудов и резервуаров
Параметрическая диагностика технологического процесса	Технологическая или механическая деградация, коррозия стенок

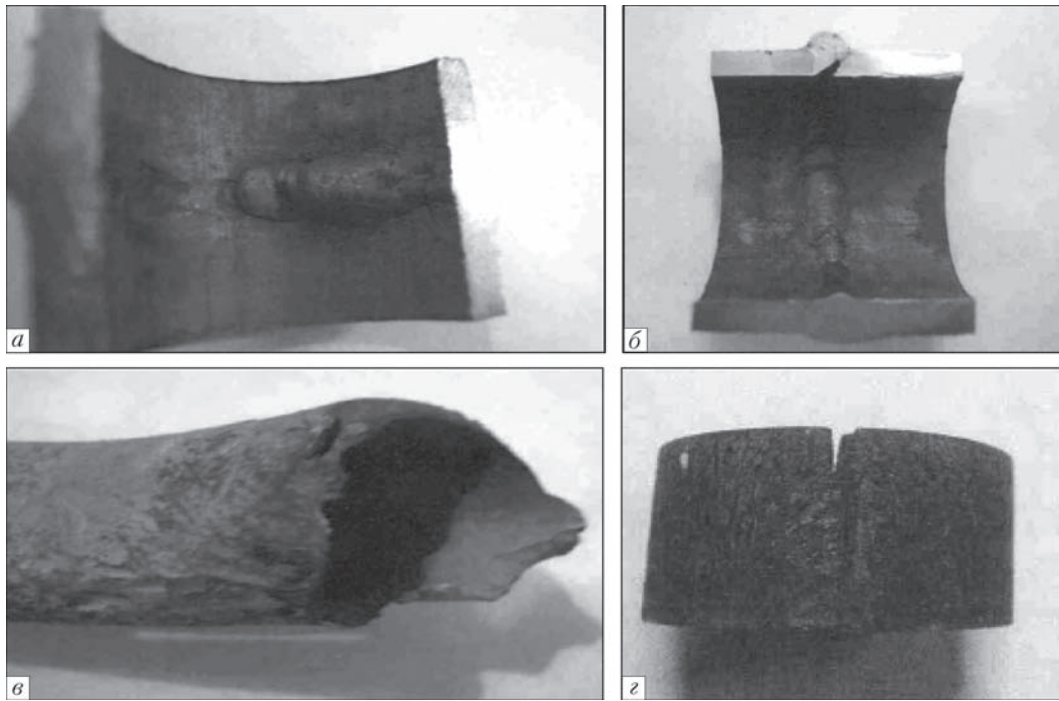


Рис. 1. Дефекты трубопроводов: дефектный шов (а); дефектный шов со свищем (б); отрыв трубы (в); раскрытие трубы (г)

методы ТД и распознавания технических состояний оборудования, применяемые при профилактическом обслуживании [15, 16].

Исследование основных причин неисправностей котельных установок позволило выявить узлы и их элементы, где наиболее часто возникают дефекты: поверхности нагрева котлов, системы топливоподачи, вспомогательное оборудование, автоматика и др. К основным причинам отказов котлов можно отнести неполадки пароперегревателя (потолочного, ширмового, конвективного), экранных труб (испарительные экраны), экономайзера, труб, которые не обогреваются и прочее. В табл. 3 и 4 приведены данные о распределении отказов оборудования энергоблоков и элементов котлов электростанций соответственно.

К аварийным ситуациям и отказам оборудования приводят следующие причины [5]: ошибки

Таблица 3. Распределение отказов оборудования энергоблоков

Оборудование	Доля отказов, %
Поверхность нагрева	79,2
Автоматика	7,4
Арматура	4,9
Вспомогательное оборудование	3,5
Топливоподача, газопроводы	2,0
Обмуровка	0,3
Регенеративные воздухоподогреватели	0,1
Прочее	2,6

проектирования; износ оборудования; заводские дефекты, недостатки узлов, деталей, агрегатов; недостатки конструкции оборудования; дефекты строительства, монтажа и наладки; дефекты при проведении ремонтных работ; несоответствие условий работы оборудования проектным режимам; ошибки дежурного, ремонтного, руководящего персонала и нарушения производственных инструкций, неточности инструкций и регламентов.

На рис. 1 представлены распространенные дефекты теплотехнического оборудования, приводящие к аварийным ситуациям [5].

При разработке системы диагностики любого технического объекта необходимо решить следующие задачи:

- изучить объект диагностирования (в том числе принципы его работы, структуру, конструкцию, функции, которые он выполняет, и т. п.);
- указать перечень всех возможных дефектов или тех из них, которые являются наиболее вероятными или наиболее критическими; условия и признаки их возникновения;

Таблица 4. Распределение отказов по элементам котлов электростанций

Элементы	Доля отказов, %
Экономайзер	30...35
Пароперегреватель	20...40
Испарительные экраны	14...30
Необогреваемые трубы	3...8
Прочие элементы	5...6

- выбрать известную или построить новую математическую модель объекта и соответствующие модели возможных дефектов;
- выбрать диагностические сигналы и параметры по каждому виду оборудования, подлежащего диагностированию;
- выбрать методы и составить алгоритмы диагностирования; оценить их качество (полноту выявления дефектов, глубину поиска); разработать или выбрать технические средства диагностирования и оценить их характеристики (безотказность, достоверность работы и т. п.).

Для решения задач мониторинга и диагностирования крупных теплоэнергетических систем целесообразно использовать методологию системного подхода. Одним из его основных положений является выделение в теплоэнергетической системе нескольких уровней иерархии. На рис. 2 приведена иерархическая структура теплоэнергетической системы промышленного предприятия (ТЭСПП). Элементы V уровня являются сложными установками (например, паровая турбина) и могут подвергаться дальнейшей детализации на более низкие уровни.

К задачам иерархических уровней II–IV относятся такие, как распределение различных видов топлива между отдельными потребителями; выбор состава и профиля основного энергетического оборудования; оптимизация параметров и вида тепловой схемы ТЭСПП и др. К задачам уровня V и низших иерархических уровней отно-

сятся выбор оптимальных термодинамических и конструктивных параметров конкретного теплоэнергетического оборудования с определенными на уровнях II–IV параметрами.

На рис. 3 показан другой подход к построению иерархической системы энергетического оборудования [17]. На самом низком I уровне расположены элементы конструкции основных узлов оборудования теплоэлектростанции. Именно этот уровень и определяет, какие дефекты возможны в объекте. Глубокое изучение элементов, расположенных на первом уровне иерархии, дает всю необходимую информацию о видах, причинах возникновения и проявлении дефектов. По результатам такого анализа строят диагностические модели, выбирают диагностические сигналы и параметры.

Собственно узлы оборудования, которые представляют собой конструктивно единое целое, это II уровень. Сюда можно отнести обмотки ротора и статора вращающихся машин, магнитопроводы, подшипниковые узлы, корпус, станину, фундамент, систему охлаждения. Электротехническое оборудование теплоэлектростанции: генераторы, двигатели собственных потребностей, трансформаторы, выключатели, изоляторы, насосы и т. д. – это III уровень; IV уровень иерархии – это уровень теплоэлектростанции в целом.

Можно рассматривать и более высокие уровни: энергообъединение, энергосистему страны и т. д.

Данные подходы к рассмотрению теплоэнергетической системы позволяют использовать тех-

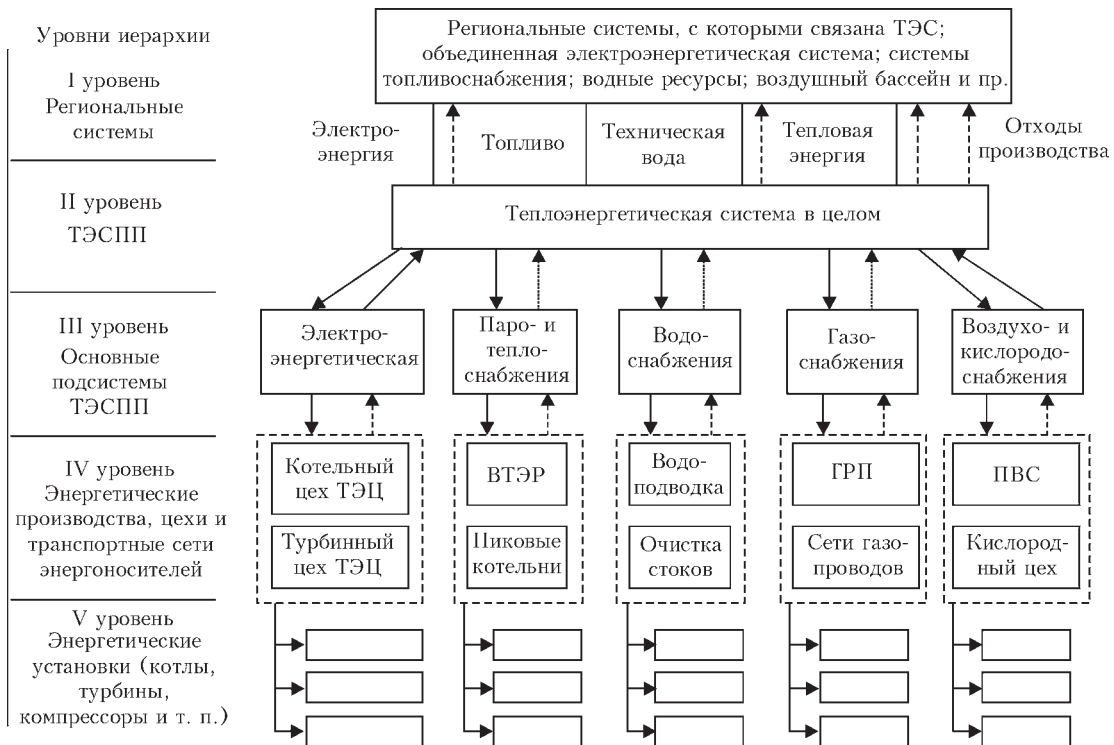


Рис. 2. Иерархическая структура теплоэнергетической системы крупного предприятия: (ТЭС – теплоэнергетическая система; ТЭЦ – теплоэлектроцентраль; ВТЭР – вторичные топливо-энергетические ресурсы; ГРП – газораспределители; ПВС – паровоздуходувные станции)

нологию Smart Grid для диагностирования отдельных уровней. Ее суть состоит в мониторинге и принятии диагностических решений на каждом из отдельных иерархических уровней для выявления, локализации и устранения дефектов до того, как объекты диагностирования станут неисправными.

Появление и развитие концепции Smart Grid является естественным этапом эволюции теплоэнергетической системы, обусловленным, с одной стороны, очевидными потребностями и проблемами текущего теплоэнергорынка, а, с другой, технологическим прогрессом, в первую очередь, в области компьютерных и информационных технологий.

Действующую тепловую энергетическую систему без Smart Grid можно охарактеризовать как пассивную и централизованную, особенно в части последнего звена – от распределительных сетей к потребителям. Именно в этой части цепи поставок тепловой энергии технология Smart Grid наиболее существенно меняет принципы функционирования, предлагая новые подходы активного и

децентрализованного взаимодействия составляющих системы.

Технология Smart Grid характеризуется несколькими инновационными свойствами, соответствующими новым потребностям рынка, среди которых (рис. 4):

- активная двунаправленная схема взаимодействия в реальном времени и информационного обмена между всеми участниками сети;
- охват всей технологической цепочки теплоэнергетической системы: производителей тепловой энергии, распределительных сетей и конечных потребителей;
- использование цифровых коммуникационных сетей и интерфейсов обмена данными;
- Smart Grid «умеет» эффективно защищаться и самовосстанавливаться после сбоев, природных катаклизмов, внешних угроз;
- технология Smart Grid способствует оптимальной эксплуатации инфраструктуры теплоэнергетической системы и распределению тепловой энергии между потребителями с учетом их приоритета;



Рис. 3. Условная структура энергетического оборудования теплоэнергетической системы

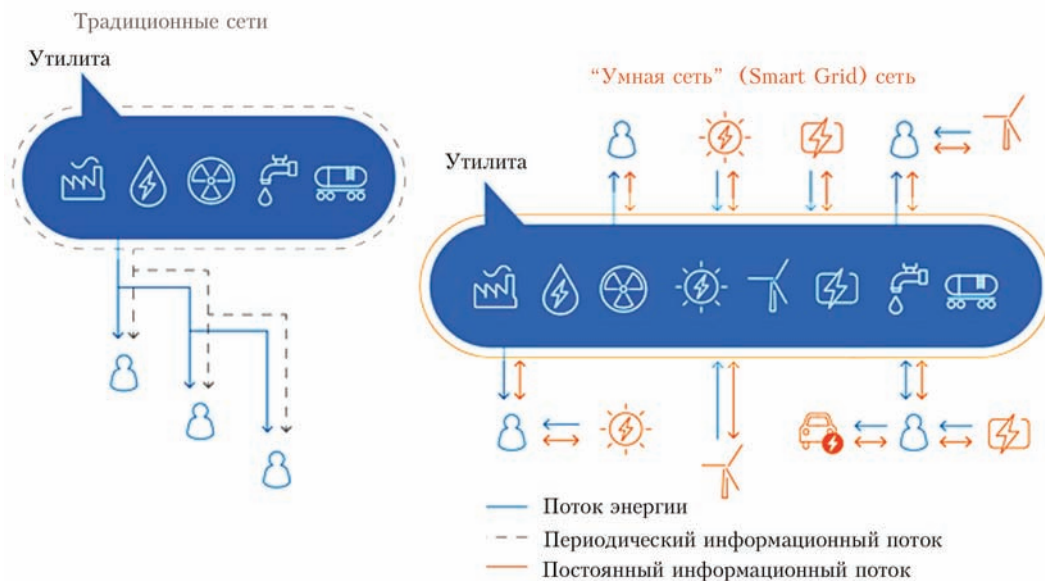


Рис. 4. Показательная схема различия традиционных и «умных» энергетических сетей

– с точки зрения общей экономики Smart Grid способствует появлению новых рынков тепловой энергии, участников и услуг.

Структура системы Smart Grid представлена следующими элементами:

- Smart Sensors and Devices – интеллектуальные датчики и устройства для магистральных и распределительных сетей;

- IT Hardware and Software – информационные технологии, используемые в магистральных и распределительных сетях;

- Smart Grid Integrated Communications – интегрированные системы контроля и управления – комплексные решения в области автоматизации; некий аналог известных систем ERP (Enterprise Resource Planning) в пределах предприятия;

- Smart Metering Hardware and Software – интеллектуальные счетчики в форме программно-аппаратных средств.

Технологическая база Smart Grid состоит из следующих ключевых сегментов:

- учет энергоресурсов;

- автоматизация распределительных сетей;

- управление и мониторинг состояния теплоэлектротехнического оборудования;

- автоматизация магистральных электрических сетей и узловых подстанций и регулирование перетоков;

- электрические сети и установки потребителей;

- нетрадиционные и возобновляемые источники энергии.

Исходя из иерархий теплоэнергетического оборудования, рассмотренных выше, можно построить структуру системы ТД на базе технологии Smart Grid. Данная система должна измерять диагностические сигналы, которые несут информацию о фактическом состоянии узлов диагно-

тированного оборудования. Таким образом, в состав системы могут быть включены сенсоры тех физических величин, которые используются для диагностирования конкретно заданной системы. В зависимости от объекта диагностирования в состав системы могут входить: термопары или терморезисторы для измерения температуры; акселерометры для измерения параметров вибраций; измерительные микрофоны для определения уровня акустических шумов; сенсоры электрических величин для измерения параметров функционирования трансформаторов; сенсоры давления для контроля за разрежением в топке; сенсоры газов для определения концентрации вредных веществ в дымовом тракте; счетчики тепловой энергии для определения текущего режима работы теплотехнического оборудования и др.

Современные системы диагностики практически всегда строятся на основе некоторого цифрового средства вычисления (микроконтроллера, персонального компьютера, промышленной рабочей станции и т. д.). Для системы диагностирования, которая соответствует основным принципам концепции Smart Grid, это требование является обязательным, поскольку в рамках «умных сетей» обмен информацией осуществляется в цифровой форме. Таким образом, измеренные сигналы должны превращаться в цифровую форму для дальнейшей обработки в вычислительном ядре системы. Конечный этап обработки информации в системе диагностики – это отражение полученных результатов для пользователей различных уровней. Для этого в структуру системы включаются соответствующие средства, которые, в частности, должны обеспечивать авторизацию пользователей системы, распределение прав доступа, защиту информации.

В системах диагностирования сложных объектов может измеряться значительное количество диагностических сигналов, что приводит к большому обмену информацией между компонентами системы. Для уменьшения нагрузки на каналы связи (этот вопрос может быть особенно важным в случае, когда используются беспроводные каналы передачи данных) можно применить принцип децентрализации вычислительных ресурсов, что является одним из принципов концепции Smart Grid. Данная задача может быть решена следующим образом: измеренная реализация диагностического сигнала передается в вычислительное ядро системы непосредственно после оцифровки и подвергается упрощенной обработке в том модуле, который отвечает за ее измерения. Далее, в зависимости от результатов такого промежуточного анализа, этот модуль решает, какую информацию предоставлять в вычислительное ядро:

- вообще не передавать никакой информации – если не было обнаружено никаких отклонений от нормального состояния;
- подать предупредительный сигнал – если обнаружены несущественные отклонения;
- предоставить измеренную реализацию в вычислительное ядро для проведения полного анализа – если выявленные отклонения можно считать существенными;
- подать аварийный сигнал для немедленного реагирования – если были обнаружены критические отклонения.

Таким образом, структуру разрабатываемой системы диагностирования можно условно разделить на иерархические уровни (рис. 5), аналогично тому, как это было сделано выше для энергетического оборудования теплоэнергетической системы (см. рис. 3).

Для отображения информации локальным пользователям (например, обслуживающему персоналу), а также для обмена информацией с центральной системой диагностирования (ЦСД) ТЭЦ все местные системы диагностирования (МСД) включаются в локальную сеть, работающую на основе Ethernet.

Для предоставления возможности обмена информацией с внешними пользователями (это могут быть как люди, так и устройства, работающие за пределами данной ТЭЦ, но объединенные в «умную сеть»), ЦСД имеет связь с глобальной сетью (Internet). Поэтому возникает ряд серьезных проблем обеспечения защиты информации и предотвраще-

ния возможных террористических атак. Для решения этих проблем используются специальные аппаратные средства защиты сети.

Система диагностирования теплотехнического оборудования может работать как с проводной, так и беспроводной МСД на основании данных, полученных от объекта диагностирования (ОД) при помощи измерительных преобразователей (ИП₁–ИП_к). Проводная МСД состоит из блоков согласования (БС₁–БС_н), коммутатора (К), аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) и ЭВМ. Беспроводная МСД состоит из блоков преобразования (БП₁–БП_к), микроконтроллера (МК), средств беспроводной связи (СБС) и ЭВМ с пакетом прикладных программ (ППП). Использование как проводных, так и беспроводных МСД позволяет значительно расширить класс диагностируемого теплоэнергетического оборудования.

Учет степени критичности дефектов на этапе разработки системы дает возможность упростить ее структуру, уменьшить объем информации, которая обрабатывается в системе и передается между ее иерархическими уровнями, и в конечном итоге снизить стоимость системы при одновременном сохранении на достаточном уровне ее функциональности.

Главными преимуществами предлагаемой системы диагностирования теплоэнергетического оборудования на базе технологии Smart Grid являются:

- надежность (Smart Grid предотвращает массовое отключение тепла);
- безопасность (Smart Grid постоянно контролирует все элементы сети с точки зрения безопасности их функционирования);
- энергоэффективность (снижение потребления тепловой энергии; оптимальное потребление приводит к снижению потребностей в генерирующих мощностях);
- экологичность (достигается на счет снижения количества и мощности генерирующих элементов сети; приводит к снижению концентрации вредных веществ в окружающей среде – CO, NO_x, C_xH_y, H₂, C и др.);

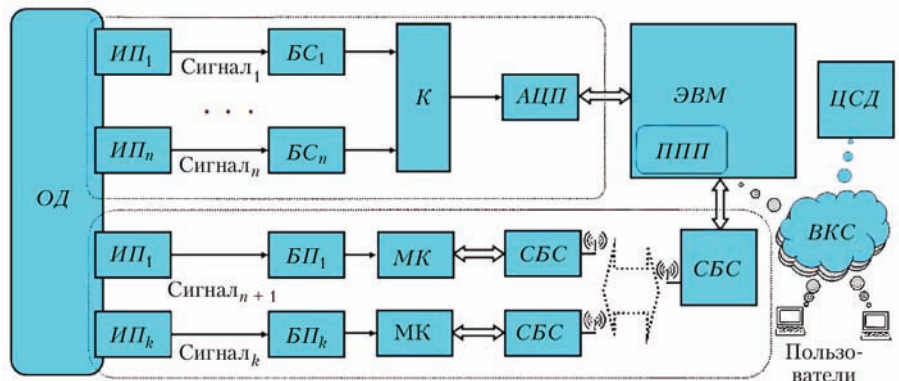


Рис. 5. Структура многоуровневой системы диагностики теплоэнергетического оборудования (ВКС – внутренние компьютерные сети)

– финансовая экономичность (снижение операционных расходов; потребители имеют точную информацию о стоимости и могут оптимизировать свои расходы на тепловую энергию; бизнес, в свою очередь, может оптимально планировать и формировать расходы на эксплуатацию и развитие генерации и распределительных сетей).

Выводы

Проведены исследования основных причин отказов теплоэнергетического оборудования в составе теплоэнергетической системы. Проанализированы причины и типы дефектов, приводящие к аварийным ситуациям и отказам оборудования.

Предложенная иерархическая структура теплоэнергетической системы позволяет применить концепцию «умных сетей» (Smart Grid) для диагностики теплотехнического оборудования. Использование такой структуры дает возможность выявить, локализовать и устранить дефекты до того, как объекты диагностирования станут неисправными.

Предложена структура многоуровневой системы диагностики, основанной на использовании концепции «умных сетей» (Smart Grid). Применение системы позволяет проводить: первичный отбор и подготовку диагностических сигналов, включая преобразование в цифровую форму; математическую обработку, принятие промежуточных диагностических решений, сигнализацию о возможных дефектах; накопление, полноценную обработку и глубокий анализ данных, быстрое реагирование на аварийные сигналы с низшего уровня, принятие диагностических решений по объекту диагностики в целом, архивацию статистических данных, прогнозирование надежности и оценки остаточного ресурса оборудования, планирование ремонтных работ; представления данных различным пользователям и обеспечение защиты системы и ее информации от возможных внешних вмешательств.

Список литературы

1. Бабак В. П. та ін. (2016) *Апаратно-програмне забезпечення моніторингу об'єктів генерування, транспортування та споживання теплової енергії*. Київ, Ін-т технічної теплофізики НАН України.
2. Ершов С. В., Дмитриев А. М. (2014) Анализ методик и подходов к проблеме диагностирования технического состояния сетей электроснабжения. *Известия ТулГУ. Технические науки*, **8**, 88-97.
3. Герике Б. Л. (1999) Мониторинг и диагностика технического состояния машинных агрегатов: Учеб. пособие в 2-х ч. Ч.1.: *Мониторинг технического состояния по параметрам вибрационных процессов*. Кемерово, Кузбас. гос. тех. ун-т.
4. Абрамов И. Л. (2011) *Вибродиагностика энергетического оборудования*: учеб. пособие. – Кемерово, Кузбас. гос. тех. ун-т.
5. Беляев С. А., Литвак В. В., Солод С. С (2008) *Надежность теплоэнергетического оборудования ТЭС*. Томск, Изд-во НТЛ.
6. Бабак В. П. и др. (2016) Повышение эффективности сжигания топлива с учетом неопределенности измерения концентрации кислорода. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, Т. 6, **8 (84)**, 54–59.

7. Бабак В. П., Запорожець А. О. (2014) Система якості горіння повітряно-паливної суміші в котлоагрегатах малої та середньої потужності. *Методи та прилади контролю якості*. **2(33)**. 106–114.
8. Бабак В. П., Запорожець А. О., Редько О. О. (2015) Підвищення точності вимірювання коефіцієнта надлишку повітря в котлоагрегатах із застосуванням газоаналізаторів електрохімічного типу. *Промислова теплотехніка*. **1**. 82–96.
9. Запорожець А. А. (2014) Автоматическая система регулирования тягодутьевыми механизмами котла с использованием зондового альфа-индикатора. *Наука и мир*. **3**. 168–170.
10. Воликов А. Н., Новиков О. Н., Окагьев А. Н. (2010) Повышение эффективности сжигания топлива в котлоагрегатах. *Энергонадзор-информ*. **1**. 54–57.
11. Н. Л. Михайлова и др. (2016) Инфракрасная диагностика теплоэнергетического оборудования. *Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук*. **1–2**. 103–105.
12. Ahmed Md. A., Huda A.S.N, Isa N.A.M. (2015) Recursive construction of output-context fuzzy systems for the condition monitoring of electrical hotspots based on infrared thermography. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. **39**. 120–131.
13. Khrumshin V. R. et al. (2015) Monitoring technical state of the power transformers is a necessary condition of the Smart-Grid technology introduction within the industrial electric networks. *Young researchers in electrical and electronic engineering conference (EIConRusNW), 2015 IEEE NW Russia*. – St. Petersburg, pp. 214–220.
14. Mariam L., Basu M., Conlon M. F. A Review of existing microgrid architectures (2013) *Journal of engineering*. **2013**, Article ID 937614.
15. Недосека А. Я. (2005) Контроль критического напряженного состояния методом акустической эмиссии. *В мире неразрушающего контроля*, **1 (27)**, 14–16.
16. Патон Б. Е. и др. (2012) Опыт ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины в области акустико-эмиссионного контроля. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. **1**. 7–22.
17. Мислович М. В., Сисак Р. М. (2015) Про деякі особливості побудови інтелектуальних багаторівневих систем технічної діагностики електроенергетичних об'єктів. *Технічна електродинаміка*. **1**. 78–85.

References

1. Babak V. P. ta in. (2016) *Aparatno-programne zabezpechennia monitorynhu ob'ektiv heneruvannia, transportuvannia ta spozhyvannia teplovoi enerhii*. Kyiv, In-t tekhnichnoi teplofizyky NAN Ukrainy. [in Ukrainian]
2. Yershov S. V., Dmitriyev A. M. (2014) Analiz metodik i podkhodov k probleme diagnostirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya setey elektrosnabzheniya. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskkiye nauki*, **8**, 88-97. [in Russian]
3. Gerike B. L. (1999) Monitoring i diagnostika tekhnicheskogo sostoyaniya mashinnykh agregatov: Ucheb. posobiye v 2-kh ch. Ch.1.: *Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya po parametram vibratsionnykh protsessov*. – Kemerovo, Kuzbas. gos. tekhn. un-t. [in Russian]
4. Abramov I. L. (2011) *Vibrodagnostika energeticheskogo oborudovaniya: ucheb. posobiye*. Kemerovo, Kuzbas. gos. tekhn. un-t. [in Russian]
5. Belyayev S. A., Litvak V. V., Solod S. S (2008) *Nadezhnost teploenergeticheskogo oborudovaniya TES*. Tomsk, Izd-vo NTL. [in Russian]
6. Babak V. P. i dr. (2016) Povysheniye effektivnosti szhiganiya topliva s uchetom neopredelennosti izmereniya kontsentratsii kisloroda. *Vostochno-Yevropeysky zhurnal peredovykh tekhnology*. **6, 8 (84)**. 54–59. [in Russian]
7. Babak V. P., Zaporozhets A. O. (2014) Sistema yakosti horinnia povitriano-palyvnoi sumishi v kotloahrehatakakh maloi ta serednoi potuzhnosti. *Metody ta prylady kontroliu yakosti*. **2(33)**. 106–114. [in Ukrainian]
8. Babak V. P., Zaporozhets A. O., Redko O. O. (2015) Pidyshchennia tochnosti vymiryuvannia koefitsienta nadlyshku povitria v kotloahrehatakakh iz zastosuvanniam

- hazoanalizatoriv elektrokhimichnoho typu. *Promyshlennaya teplotekhnika*. 1. 82–96. [in Ukrainian]
9. Zaporozhets A. A. (2014) Avtomaticheskaya sistema regulirovaniya tyagodyutevymi mekhanizmami kotla s ispolzovaniyem zondovogo alfa-indikatora. *Nauka i mir*. 3. 168–170. [in Russian]
 10. Volikov A. N., Novikov O. N., Okatyev A. N. (2010) Povysheniye effektivnosti szhiganiya topliva v kotloagregakh. *Energonadzor-inform*. 1. 54–57. [in Russian]
 11. Mikhaylova N. L. i dr. (2016) Infrakrasnaya diagnostika teploenergeticheskogo oborudovaniya. *Aktualnye problemy gumanitarnykh i yestestvennykh nauk*. 1–2. 103–105. [in Russian]
 12. Ahmed Md. A., Huda A.S.N, Isa N.A.M. (2015) Recursive construction of output-context fuzzy systems for the condition monitoring of electrical hotspots based on infrared thermography. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 39. 120–131.
 13. Khramshin V. R. et al. (2015) Monitoring technical state of the power transformers is a necessary condition of the Smart-Grid technology introduction within the industrial electric networks. *Young researchers in electrical and electronic engineering conference (EIConRusNW), 2015 IEEE NW Russia*. – St. Petersburg, pp. 214–220.
 14. Mariam L., Basu M., Conlon M. F. A Review of existing microgrid architectures (2013) *Journal of engineering*. 2013, Article ID 937614.
 15. Nedoseka A. Ya. (2005) Kontrol kriticheskogo napryazhennogo sostoyaniya metodom akusticheskoy emissii. *V mire nerazrushayushchego kontrolya*, 1 (27), 14–16. [in Russian]
 16. Paton B. E. i dr. (2012) Experience of the E.O.Paton Institute of the NAS of Ukraine in the field of acoustic-emission monitoring. *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchy kontrol*. 1. 7–22. [in Russian]
 17. Myslovych M. V., Sysak R. M. (2015) Pro deiaki osoblyvosti pobudovy intelektualnykh bahatorivnyykh system tekhnichnoi diahnostyky elektroenerhetychnykh ob'ektiv. *Tekhnichna elektrodynamika*. 1. 78–85. [in Ukrainian]

А. О. ЗАПОРОЖЕЦЬ, А. Д. СВЕРДЛОВА

Інститут технічної теплофізики НАН України. 03057, м. Київ-57, ул. Желябова, 2а. E-mail: lektron2007@gmail.com

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ
ТЕХНОЛОГІЇ SMART GRID В СИСТЕМАХ
МОНІТОРИНГУ ТА ДІАГНОСТУВАННЯ
ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

Розглянуто можливості використання «розумних мереж» в системах моніторингу та діагностики теплоенергетично-

го обладнання. Проаналізовано причини несправностей та аварійних ситуацій обладнання генерації, транспортування та споживання теплової енергії. Розглянуто основні методи неруйнівного контролю, що застосовуються для діагностики технічних вузлів, та інформативні сигнали, що виникають в процесі експлуатації енергетичного обладнання. Запропоновано структури функціонування теплоенергетичного обладнання для застосування технології Smart Grid в системах моніторингу та діагностування відповідних ієрархічних рівнів. Досліджено основні переваги енергетичних мереж на базі технології Smart Grid перед традиційними мережами. Розроблено структуру багаторівневої системи діагностики теплоенергетичного обладнання з можливістю використання дротяних і бездротових каналів передачі інформації. Бібліогр. 17, табл. 4, рис. 5.

Ключові слова: система діагностики, теплоенергетичне обладнання, неруйнівний контроль, технологія Smart Grid

A. A. ZAPOROZHETS, A. D. SVERDLOVA

Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine. 2-a, Zhelyabov str., Kyiv, 03057. E-mail: lektron2007@gmail.com

PECULIARITIES OF APPLICATION OF SMART GRID
TECHNOLOGY IN SYSTEMS FOR MONITORING AND
DIAGNOSTICS OF HEAT-AND-POWER ENGINEERING
OBJECTS.

The possibilities of application of “smart grids” in the systems for monitoring and diagnostics of heat-and-power engineering equipment were considered. The reasons of failures and emergencies of equipment for generation, transporting and consumption of thermal energy were analyzed. Considered were the methods of non-destructive testing applicable to diagnostics of technical assemblies and informative signals, which appear in process of power equipment operation. Functioning structures of heat-and-power engineering equipment were proposed for application of the Smart Grid technology in the systems for monitoring and diagnostic of corresponding hierarchy. The main advantages of power grids based on the Smart Grid technology in comparison with traditional grids were investigated. A structure was developed for multi-level system of diagnostic of heat-and-power engineering equipment with possibility of application of wire and wireless channels of information communication. Ref. 17, Tables 4, Figures 5

Keywords: diagnostic system, heat-and-power engineering equipment, non-destructive testing, Smart Grid technology

Поступила в редакцію
06.01.2017

Товариство зварників України

Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України

НАУКОВО-ПРАКТИЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ «СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ ЗВАРЮВАЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА»

Присвячується 25-річчю Товариства зварників України та

175-річчю М. М. Бенардоса – винахідника дугового зварювання

22–23 листопада 2017 р, м. Київ, Міжнародний виставковий центр

- розвиток прогресивних зварювальних процесів
- нові зварювальні матеріали та обладнання
- проблеми і тенденції автоматизації зварювальних та споріднених процесів
- впровадження прогресивних технологій при виготовленні та ремонті металоконструкцій
- стандартизація та сертифікація в зварювальному виробництві
- підготовка кадрів та організація конкурсів професійної майстерності
- проблеми екології
- розвиток міжнародного співробітництва.

Свої пропозиції та тези доповідей просимо направляти до 1 серпня 2017 р.

за адресою: maksimov@paton.kiev.ua, pwi37@ukr.net

УЛЬТРАЗВУКОВИЙ МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ РОЗСІЯНОЇ ПОШКОДЖЕНОСТІ МАТЕРІАЛУ НА ОСНОВІ ЗВОРОТНО-РОЗСІЯНОГО СИГНАЛУ

Р. І. РОМАНИШИН, Я. Л. ІВАНИЦЬКИЙ, В. В. КОШОВИЙ, С. Т. ШТАЮРА, І. М. РОМАНИШИН,
О. М. МОКРИЙ, П. М. СЕМАК

Фізико-механічний інститут НАН України. 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5. E-mail: pminasu@lviv.ua

Запропоновано неруйнівний метод оцінювання розсіяної пошкодженості в об'ємі матеріалу на основі реєстрації зворотного-розсіяного ультразвукового сигналу у вигляді А-скану. Викладені інформаційні технології обробки зворотного-розсіяного сигналу та результати експериментальної апробації на зразках з різним ступенем водневої пошкодженості. Бібліогр. 25, рис. 4.

Ключові слова: розсіяна пошкодженість, ультразвуковий зворотний-розсіяний сигнал, статистична обробка, дисперсія, В-скан

В даний час актуальною задачею є оцінювання розсіяної пошкодженості (деградації) матеріалу неруйнівними методами [1]. Переважно пошкодженість матеріалу пов'язують з виникненням мікродефектів (мікропор, мікротріщин), їх об'єднанням до виникнення макродефекту [2–9].

Для кількісного оцінювання розсіяної пошкодженості Ю. М. Работновим введено параметр D [в оригіналі ω], який є площею пор (тріщин) на одиницю площі поперечного перерізу в даний момент часу, тобто відношенням площі пор до площі поперечного перерізу [10, 11]. Іншими словами така величина є «дефектом площі» [5, 6] (відносною зміною площі поперечного перерізу внаслідок виникнення пор [10]):

$$D = (S_0 - S)/S_0, \quad (1)$$

де S_0 – площа поперечного перерізу при відсутності пошкодження; S – «ефективна площа» цього ж перерізу (за виключенням сумарної площі пошкоджених); $S_0 - S$ – площа пошкоджених.

Для непошкодженого матеріалу $D = 0$. Із зростанням пошкодженості D зростає до 1. В момент руйнування $D(t = T_{cr}) = 1$.

Для оцінювання пошкодженості Л. М. Качановим запропонований структурний параметр суцільності ψ , який характеризує мікродефектність структури [12]. При «відсутності пошкодженості» $\psi = 1$. Зі зростанням пошкодженості ψ спадає до нуля. Можна вважати, що $D = 1 - \psi$.

Слід відмітити, що є різні матеріалознавчі інтерпретації пошкодженості.

Одна з інтерпретацій стосується того, що з ростом пошкодженості зменшується опір матеріалу розтягуючим напруженням. При оцінюванні пошкодженості на основі відношення площі пор до загальної (початкової) площі поперечного пере-

різу (1) збільшення пошкодженості супроводжується збільшенням площі пор. В результаті цього зменшується ефективна площа поперечного перерізу, яка реально несе розтягуюче навантаження, і це приводить до зменшення опору матеріалу розтягу.

Інша інтерпретація стосується скорочення пружного відгуку тіла з ростом пошкодженості. Середнє напруження в перерізі при зовнішньому нормальному напруженні σ_0 зростає із зростанням пошкодженості матеріалу [10]:

$$\sigma = \sigma_0 / (1 - D) \quad (2)$$

так як в пошкодженому матеріалі $0 < D < 1$.

Це приводить до скорочення пружного відгуку тіла внаслідок зменшення ефективної площі, яка передає внутрішні зусилля від однієї частини тіла до іншої, що, в свою чергу, обумовлює появу і розвиток розсіяного поля мікродефектів (мікротріщин – при пружній деформації, дислокацій – при пластичній, мікропор – при повзучості, поверхневих мікротріщин – при втомі [13]).

Для експериментального оцінювання пошкодженості найширше використовуються методи, які базуються на визначенні об'ємної густини металу [7].

Накопичення мікродефектів в металі (зростання пористості) приводить до зниження його густини. Тому найпростішим методом дослідження пошкодженості є прецизійне зважування. Практика показує, що в цьому випадку для визначення густини металу методом гідростатичного зважування необхідна точність зважування до $\pm 0,0001$ г на зразках-вирізках від 5 до 20 г [7].

Отриману густину металу необхідно співставити з його густиною у вихідному стані і в момент руйнування. Так, густина сталі 12Х1МФ у вихідному стані 7,835, а в момент руйнуван-

ня 7,778 г/см³, тобто «дефект» густини при руйнуванні сталі всього 1...1,25 % [7]. Це вимагає високої точності зважування при проведенні експерименту.

Для експериментального оцінювання пошкодженості матеріалу використовують відносні зміни параметрів, які чутливі до накопичення пошкоджень [6]. Надано узагальнений параметр для оцінки пошкодженості у вигляді відносної зміни деякого параметра, чутливого до пошкодженості:

$$\Delta W = 1 - P_d/P_0, \quad (3)$$

де P_d – параметр для матеріалу з пошкодженням; P_0 – параметр для непошкодженого матеріалу.

До параметрів, чутливих до накопичення пошкоджень, відносять густину, модулі пружності, акусто-емісійні параметри [5, 6].

При цьому говорять про «дефект густини», «дефект модуля пружності» та інші «дефекти...», розуміючи під цим відносні зміни параметрів через пошкодженість.

Зауважимо, що «дефект» густини еквівалентний «дефекту» об'єму (відносній зміні об'єму) зі знаком мінус [14].

Традиційно ультразвукові методи оцінювання стану металу (пошкодженості) базуються на вимірюванні швидкості поширення ультразвукової хвилі [15].

Відносні зміни швидкості ультразвуку при діагностиці напружень складають соті долі процента, а при діагностиці структурних змін – десятки долі процента [15]. Це накладає жорсткі вимоги на точність вимірювання швидкості, а також свідчить про низьку чутливість цих підходів.

В 1970-х рр. отримані перші експериментальні дані про те, що в процесі накопичення втомних пошкоджень зміна мікроструктури металу може призводити до багатократного росту акустичної нелінійності [16]. При цьому може мати місце якісна модифікація нелінійних ефектів.

Висока «структурна чутливість» акустичної нелінійності часто спостерігається вже на початковій стадії пошкодження матеріалу при ще майже незмінних лінійних пружних модулях [16]. На цій стадії традиційні методи на основі змін швидкості пружних хвиль ще не дозволяють виявити і оцінити пошкодженість металу.

Причиною сильного зростання акустичної нелінійності мікронеоднорідних середовищ в більшості випадків є наявність в структурі середовища компонентів з різко контрастними лінійними пружними властивостями. Причому розмір м'яких включень-дефектів малий порівняно з довжиною пружної хвилі, а також мала концентрація цих включень.

Прикладами таких контрастно-м'яких дефектів є тріщини, міжзеренні контакти, накопичення дислокацій по границях зерен полікриста-

лів [16]. Ці мікродефекти є також розсіювачами ультразвуку.

Ультразвуковий метод оцінювання пошкодженості матеріалу на основі зворотно-розсіяного сигналу ґрунтується на наступних закономірностях, експериментально перевірених фактах і гіпотезах:

- деградація матеріалів в процесі експлуатації супроводжується структурними змінами, які призводять до формування і розвитку розсіяної пошкодженості матеріалу в об'ємі виробу і проявляються у збільшенні розкиду фізико-механічних характеристик матеріалу [2, 4, 8, 9];

- місця з підвищеною розсіяною пошкодженістю матеріалу є найбільш ймовірними щодо виникнення дефектів;

- одним з найчутливіших сигналів до структурних змін в матеріалі (розсіяної пошкодженості) на мезорівні (порядка довжини зондуєчої хвилі) є розсіяний ультразвуковий сигнал;

- при збільшенні розсіяної пошкодженості матеріалу інтенсивність розсіювання (в т. ч. зворотного) ультразвуку зростає.

Однією з перших робіт, в якій приведені експериментально зареєстровані осцилограми зворотно-розсіяного сигналу на зразках з водневою пошкодженістю і непошкоджених, є робота [17]. Автори роботи стверджують, що всі попередні роботи по оцінюванню впливу водневої пошкодженості ультразвуковими методами обмежувались вимірюванням швидкості і загасання, зворотне розсіювання не використовувалось. Воно використовувалось, в основному, для визначення розміру зерна в неруйнівному контролі (1989 р.). Як впливає з роботи [17], амплітуда зворотно-розсіяного сигналу на частоті 10 МГц в результаті водневої пошкодженості зростає в 7...12 разів.

Ультразвуковому дослідженню пошкодженості сталей (на прикладі водневої пошкодженості) присвячена робота [18].

Огляд методів виявлення та оцінювання наводненості в сталях приведено в статті [19].

В роботі [20] приведені В-скани пошкодженого матеріалу на основі сканування об'єктів за допомогою ультразвукової решітки.

Таким чином, експериментальні дослідження експлуатованих об'єктів свідчать про перспективність застосування зворотно-розсіяного сигналу для оцінювання пошкодженості сталей, який зростає в рази (на прикладі водневої пошкодженості). В той же час в літературі приведені тільки якісні результати, отримані на основі реєстрації зворотно-розсіяного сигналу. Зворотно-розсіяний сигнал, як правило, слабкий, шумоподібний (і зашумлений). Крім того, його рівень залежить від рівня зондуєчого сигналу, акустичного контакту, підсилення приймального тракту, апаратурних завад,

загасання в процесі поширення тощо. Тому актуальною задачею є розробка інформаційної технології обробки зворотно-розсіяного сигналу, яка би враховувала ці завади.

Попередня обробка зареєстрованого прямим роздільно сумішеним п'єзоперетворювачем ультразвукового сигналу у вигляді А-скану забезпечує врахування технічних характеристик передавально-приймального тракту, а саме частоти зондування і дискретизації, розрядності АЦП, постійної складової (або низькочастотного тренду). На цьому етапі проводиться виділення інформативної частини зареєстрованого сигналу, що відповідає розсіюванню по шляху першого поширення зондуючого сигналу від ультразвукового давача до відбиваючої донної поверхні, а в часовій області від кінця імпульсу, відбитого від границі призма-метал, до початку першого донного відбитого луно-сигналу.

При поширенні високочастотного (10 МГц) зондуючого ультразвукового сигналу в матеріалі здійснюється амплітудна модуляція сигналу неоднорідностями середовища і, в першу чергу, пошкодженістю. Тому для визначення рівня пошкодженості необхідно здійснити демодуляцію сигналу.

Маємо зареєстровану реалізацію А-скану $s_i^{reg} = s_i + n_i, i = 1, \dots, N$, де N – загальна кількість відліків; s_i – зворотно-розсіяний сигнал; n_i – адитивна шумова складова (апаратні шуми), якої позбуваються шляхом багатократної реєстрації і усереднення реалізацій:

$$\bar{s}_i^{reg} = \bar{s}_i + \bar{n}_i \Big|_{\bar{n}_i \rightarrow 0, at K \rightarrow \infty}, i = 1, \dots, N, \quad (4)$$

де K – кількість зареєстрованих реалізацій в одній «точці» (для усереднення і усунення апаратних шумів).

На першому етапі здійснюється демодуляція зареєстрованого сигналу:

$$S_i = \frac{1}{\Delta_t} \sum_{n=i-\frac{\Delta_t}{2}+1}^{n=i+\frac{\Delta_t}{2}} \left(\frac{s_n - s^0}{A} \right)^2, \quad (5)$$

де $i = \text{Int}(\Delta_t / 2), \dots, N - \text{Int}(\Delta_t / 2)$, $\Delta_t = \text{Int}(\Omega / \omega)$ – тривалість зондуючого імпульсу (у відліках); ω – частота зондування (10 МГц); Ω – частота дискретизації (68 МГц); N – тривалість реалізації у відліках (2^{11}); s_n – n -ий відлік зареєстрованого сигналу; s^0 – постійна складова (512); A – розмах сигналу для заданої розрядності АЦП ($2^{10} = 1024$).

Слід зауважити, що приведене детектування є обчисленням автокореляційної функції шумоподібного модульованого сигналу при нульовій затримці, що є енергетичною характеристикою (дисперсією) сигналу.

Крім того, при обчисленні автокореляції синусоїдального функції на основі скінченного числа даних виникає похибка із-за скінченності числа

(«урізання») даних. В цьому випадку для синусоїдального сигналу автокореляцію можна представити у вигляді двох складових: «правильної» автокореляції (як такої, що отримується на основі нескінченного числа даних) та «похибки», яка виникає із-за «урізання» даних [21]. Ця складова дорівнює нулю, коли інтервал, впродовж якого обчислюється «урізана» автокореляція, співпадає або кратний періоду синусоїдального сигналу.

Таким чином, усереднення інтенсивності на періоді несучої забезпечує практично відсутність похибки автокореляції із-за «урізання» даних.

Інтенсивність зареєстрованого сигналу (5) залежить не тільки від розсіювальної здатності матеріалу (наприклад, перерізу зворотного розсіювання), але часто в значно більшій мірі від вхідного сигналу, акустичного контакту і підсилення приймального тракту.

Розроблено метод обробки зворотно-розсіяного сигналу, який враховує рівень зондуючого сигналу, вплив акустичного контакту, підсилення приймального тракту, загасання сигналу в процесі поширення, базується на нормуванні кожного відліку інтенсивності зареєстрованого сигналу (5) до «введеної» енергії зондуючого імпульсу і дозволяє отримати профіль перерізу зворотного розсіювання по шляху поширення сигналу.

Такий підхід справедливий при наступних припущеннях.

Енергетичну модель зареєстрованого сигналу, представлену для інтенсивності, можна подати у вигляді добутку коефіцієнта, який характеризує вплив акустичного контакту і підсилення приймального тракту, на інтенсивність сигналу, коли цей коефіцієнт дорівнює одиниці:

$$S_i = F_{cont} S_i^{pr}, \quad (6)$$

де $i = 1, \dots$. Тут S_i^{pr} – інтенсивність розсіювання, яка характеризує розсіювальні властивості матеріалу і не залежить від акустичного контакту і підсилення приймального тракту.

Оцінимо вплив акустичного контакту і підсилення приймального тракту, тобто коефіцієнт F_{cont} . Проводиться зондування плоскопаралельного об'єкту прямим роздільно сумішеним п'єзоперетворювачем з реєстрацією А-скану. Зауважимо, що у випадку, коли коефіцієнт відбивання від «дна» близький до одиниці (тобто велика різниця імпедансів зондованого матеріалу (металу) і зовнішнього середовища), то практично вся енергія введеного зондуючого сигналу за один цикл (в часовій області від початку імпульсу, відбитого від границі призма-метал, до кінця першого донного відбитого імпульсу) повертається до п'єзоперетворювача. Просумуємо відліки (6) на інтервалі циклу при $i \in [i_0 - \Delta/2, i_n + \Delta/2]$ і отримаємо:

$$\sum_{i=i_0-\frac{\Delta}{2}}^{i_H+\frac{\Delta}{2}} S_i = F_{cont} \sum_{i=i_0-\frac{\Delta}{2}}^{i_H+\frac{\Delta}{2}} S_i^{pr}, \quad (7)$$

де Δ – тривалість зонduючого радіоімпульсу; i_0 – час приходу імпульсу, відбитого від границі призма-метал; i_n – час приходу першого донного відбитого сигналу (рис. 1).

Інтенсивність зворотного-розсіяного сигналу S_i^{pr} у випадку плоскої падаючої хвилі одичної амплітуди називають перерізом зворотного розсіювання [22].

У випадку плоскої падаючої хвилі одичної амплітуди енергія зонduючого імпульсу одична, тобто

$$\sum_{i=i_0-\frac{\Delta}{2}}^{i_H+\frac{\Delta}{2}} S_i^{pr} = 1 \quad (8)$$

На основі (6) з врахуванням (7) маємо:

$$S_i^{pr} = \frac{S_i}{\sum_{i=i_0-\frac{\Delta}{2}}^{i_H+\frac{\Delta}{2}} S_i} \quad (9)$$

Тобто для врахування рівня зонduючого сигналу, впливу акустичного контакту, підсилення приймального тракту кожний відлік інтенсивності, визначений на основі зареєстрованого сигналу шляхом демодуляції (5), необхідно поділити на енергію зонduючого імпульсу.

Даний метод експериментально апробувався шляхом зміни підсилення приймального тракту.

На рис. 1, а приведено приклад інтенсивностей сигналу (5), зареєстрованого в одній точці при різному підсиленні приймального тракту (кожен графік відповідає певному підсиленню).

На рис. 1, б приведені нормовані (до «введеної енергії») інтенсивності цих же сигналів (при різному підсиленні приймального тракту), отримані на основі (9) з демодульованої інтенсивності зареєстрованого сигналу (5) (рис. 1, а).

Як видно з рис. 1, інтенсивність зареєстрованого сигналу (5) змінюється в залежності від підсилення приймального тракту, в той же час нормована інтенсивність зареєстрованого сигналу до «введеної енергії» при різному підсиленні приймального тракту, розрахована на основі (9), практично не залежить від рівня підсилення.

У випадку врахування загасання зонduючого сигналу в процесі поширення кожний відлік (9) необхідно коригувати, враховуючи, що до i -ого відліку частина енергії розсіялась. Зокрема, до i -ого відліку розсіяна енергія становить:

$$S_{\left[i_0-\frac{\Delta}{2}, i-1\right]} = \sum_{n=i_0-\frac{\Delta}{2}}^{i-1} S_n \quad (10)$$

Зонduючий сигнал, який «дійшов» до місця, що відповідає i -ому відліку характеризується «запасом енергії»:

$$S_{\left[i, i_H+\frac{\Delta}{2}\right]} = \sum_{n=i}^{i_H+\frac{\Delta}{2}} S_n = \sum_{n=i_0-\frac{\Delta}{2}}^{i_H+\frac{\Delta}{2}} S_n - \sum_{n=i_0-\frac{\Delta}{2}}^{i-1} S_n = \sum_{n=i_0-\frac{\Delta}{2}}^{i_H+\frac{\Delta}{2}} S_n \left(1 - \frac{\sum_{n=i_0-\frac{\Delta}{2}}^{i-1} S_n}{\sum_{n=i_0-\frac{\Delta}{2}}^{i_H+\frac{\Delta}{2}} S_n} \right) \quad (11)$$

Для приведення кожної «точки» шляху поширення сигналу в однакові умови («одичного зонduючого сигналу») необхідно провести коригування відліків:

$$S_i^{pr*} = \frac{S_i}{\sum_{n=i_0-\frac{\Delta}{2}}^{i_H+\frac{\Delta}{2}} S_n \left(1 - \frac{\sum_{n=i_0-\frac{\Delta}{2}}^{i-1} S_n}{\sum_{n=i_0-\frac{\Delta}{2}}^{i_H+\frac{\Delta}{2}} S_n} \right)} \quad (12)$$

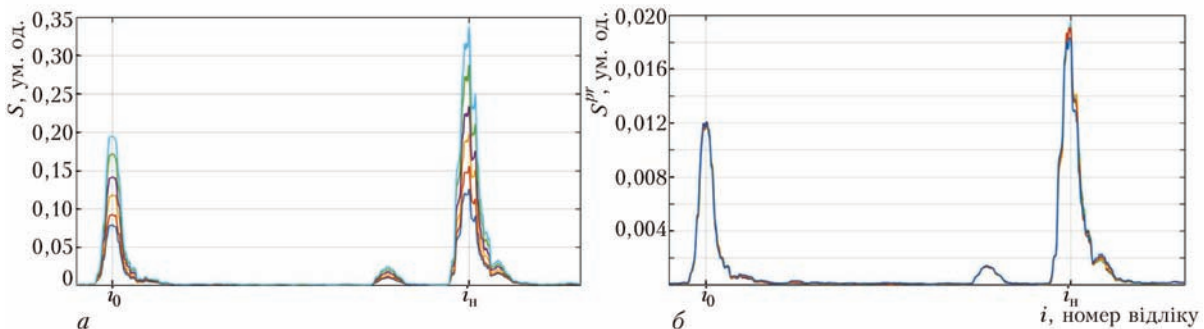


Рис. 1. Інтенсивність зареєстрованого в одній точці сигналу при різному підсиленні приймального тракту (5) (а) та нормована інтенсивність (9) (б)

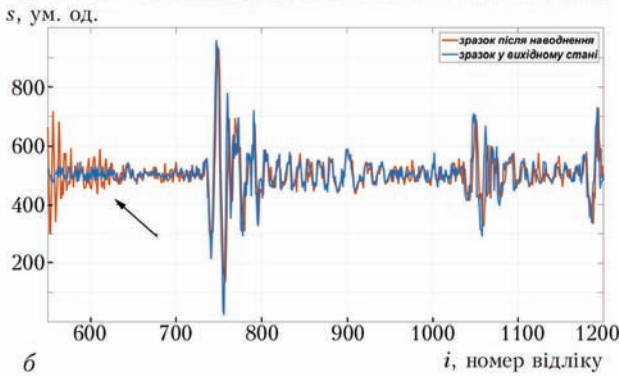
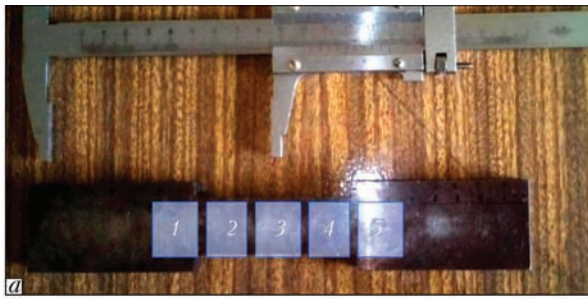


Рис. 2. Розбиття зразка на зони (а) та зареєстровані зворотньо-розсіяні сигнали на наводненому і ненаводненому зразках (б)

В результаті отримаємо оцінку перерізу зворотного розсіювання вздовж шляху поширення зондуючого сигналу.

Проведені експериментальні дослідження пошкодженості металу внаслідок сумісної дії водню і деформації.

Для дослідження нерівномірності пошкодженості вздовж зразка «робоча» частина зразка довжиною 100 мм розбивалась на 5 зон (рис. 2, а). В

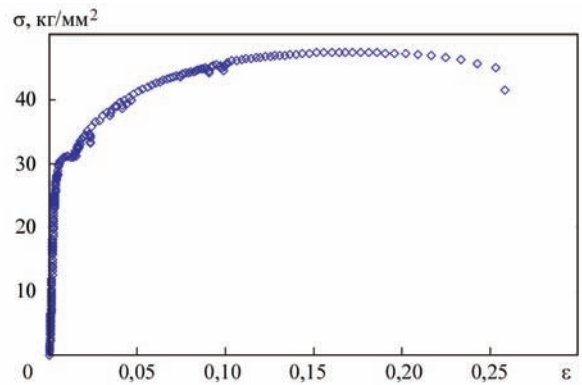


Рис. 3. Діаграма деформування сталі 09Г2С

кожній зоні проводилась реєстрація зворотньо-розсіяного сигналу з кроком 2 мм.

На рис. 2, б приведено приклад зареєстрованих сигналів на наводненому зразку та зразку у вихідному стані (тут стрілкою відмічене зростання зворотньо-розсіяного сигналу на наводненому зразку, яке може бути обумовлене пошкодженістю матеріалу).

Дослідження пошкодженості металу внаслідок сумісної дії водню і деформації проводились в наступному порядку.

Спочатку зразок зі сталі 09Г2С (рис. 2, а) витримали у водні під тиском 5 МПа за температури 420 °С протягом 4 годин. Після цього проводили реєстрацію і обробку зворотньо-розсіяного сигналу (рис. 4, а, б).

Потім зразок деформували розтягом на 19 %, що відповідало рівню границі міцності, коли починається локалізація деформації зразка з утворенням шийки (рис. 3), та повторно наводнювали в такому ж режимі, як і в попередньому випадку, і

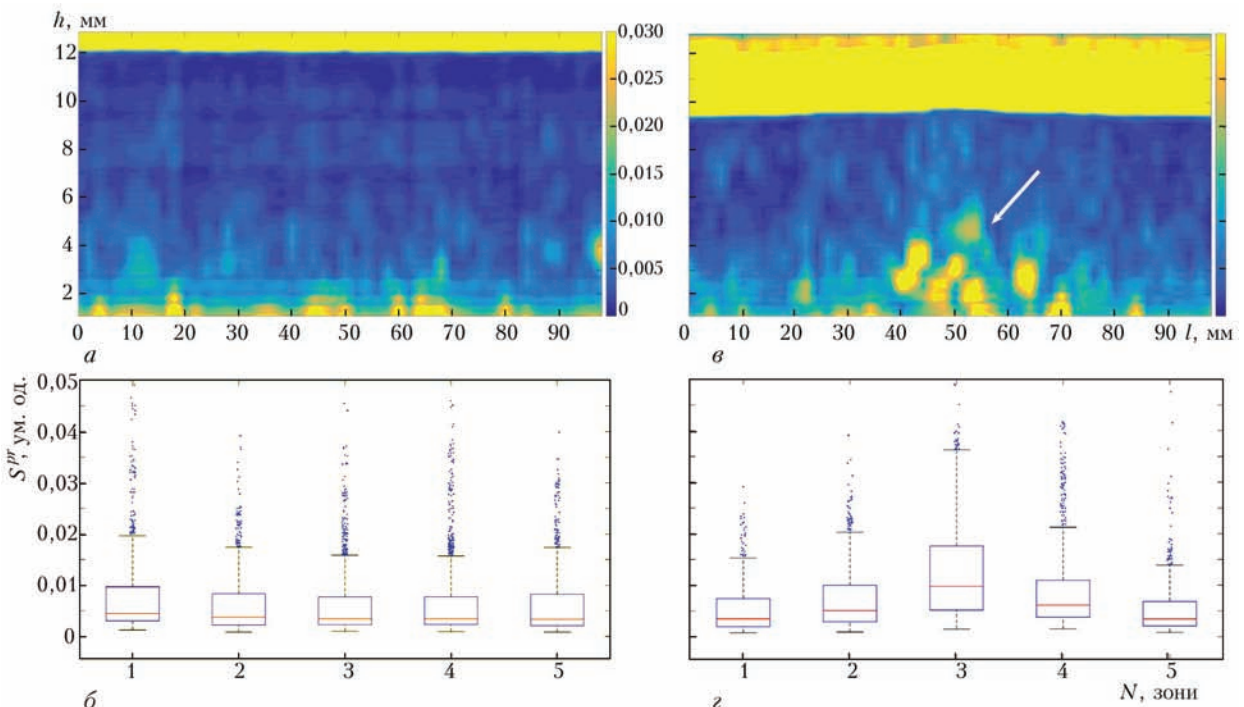


Рис. 4. Просторовий та статистичний розподіли параметрів зворотньо-розсіяного сигналу, зареєстрованих на зразку після наводнювання (а, б), деформації та повторного наводнювання (в, г)

проводили реєстрацію і обробку зворотно-розсіяного сигналу (рис. 4 в, з).

На рис. 4, а, в приведені В-скани [23] після кожного наводнювання.

Як слідує з експериментів, перше наводнювання і деформація призвели до збільшення розсіяної пошкодженості достатньо рівномірно в об'ємі зразка (рис. 4, а).

Після повторного наводнювання деформованого зразка зареєстровано значне збільшення зворотно-розсіяного сигналу в центральній частині робочої довжини зразка. Просторовий розподіл розсіяної пошкодженості став симетричним у відповідності до деформації (рис. 4, в). Це може свідчити про те, що наводнювання інтенсифікує пошкодженість попередньо деформованого металу, особливо в місці можливого утворення шийки в зразку. Цим продемонстровано можливість діагностування початкового етапу локалізації пластичної деформації і, відповідно, спричиненої воднем пошкодженості. Такий ефект подібний до явища синергізму [24] – водень значно підвищив рівень пошкодженості після деформації.

На основі зображення В-скану можна оцінювати площу пошкоджених на одиницю площі поперечного перерізу і знаходити параметр пошкодженості (1).

На рис. 4, б, з приведені результати статистичного розподілу інтенсивності зворотно-розсіяного сигналу (9) на проміжку $i \in [i_0 - \Delta/2, i_n + \Delta/2]$ (тобто від кінця імпульсу, відбитого від границі призма-метал, до початку першого донного відбитого сигналу) в кожній з п'яти областей зразка після наводнювання (рис. 4, б) та деформації і повторного наводнювання (рис. 4, з) у вигляді коробчастих діаграм [25]. Коробчасті діаграми відповідають приведеним В-сканам і дають параметри (наприклад, медіани, квартилі) для кількісної оцінки пошкодженості по поверхні зразка, які відображені якісно у вигляді В-сканів. Так після першого наводнювання (рис. 4, б) медіанне значення інтенсивності для кожної із зон лежить в околі 0,005 ум. од. Після деформації і повторного наводнювання медіанне значення інтенсивності по поверхні зразка відображає «параболічний» закон деформації при розтягу зразка з максимумом посередині зразка, який досягає значення 0,01 ум. од.

Інтегральними інформативними параметрами про ступінь пошкодженості матеріалу в «точці» реєстрації зворотно-розсіяного сигналу може бути дисперсія зворотно-розсіяного сигналу (усереднене на проміжку $[N_1, N_2]$ значення інтенсивності):

$$Disp = \sum_{i=N_1}^{N_2} \frac{1}{N_2 - N_1 + 1} S_i^{pr} \quad (13)$$

а також її розкид. Проміжок $[N_1, N_2]$ відповідає зворотно-розсіяному сигналу, тобто N_1 – кінець

імпульсу, відбитого від границі призма-метал; N_2 – початок донного відбитого сигналу.

Заключення

Розроблено та експериментально апробовано ультразвуковий метод оцінювання розсіяної пошкодженості матеріалу на основі сканування поверхні зразка прямим роздільно суміщеним перетворювачем, багатократної реєстрації і статистичної обробки зворотно-розсіяних ультразвукових сигналів. Запропоновано використати в якості інформативного параметра про рівень розсіяної пошкодженості дисперсію зворотно-розсіяного сигналу. Експериментально отримано, що просторовий розподіл дисперсії зворотно-розсіяних ультразвукових сигналів, отриманий при скануванні поверхні зразка після наводнювання – деформації – повторного наводнювання добре відповідає розподілу деформації матеріалу.

Список літератури

1. Родюшкин В. М. (2009) От поиска дефектов к поиску преддефектного состояния. *Вестник научно-технического развития*, **4**, 51–56.
2. Козинкина А. И., Рыбакова Л. М., Березин А. В. (2006) Оценка степени микроразрушений при деформации металлических материалов. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*, **72**, **4**, 39–42.
3. Бобырь Н. И., Бабенко А. Е., Халимон А. П. (2008) Континуальная механика поврежденности и ее использование в задачах сложного малоциклового нагружения. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **4**, 25–34.
4. Лебедев А. А. (2008) Новые характеристики деградации материала на стадии развития рассеянных повреждений. *Там же*, **4**, 35–44.
5. Недосека С. А., Недосека А. Я. (2010) Комплексная оценка поврежденности и остаточного ресурса металлов с эксплуатационной наработкой. *Там же*, **1**, 9–16.
6. Недосека С. А. (2010.) Диагностика і прогнозування ресурсу зварних конструкцій методом акустичної емісії. АР-дра техн. наук по спец. 05.02.10 «Діагностика матеріалів і конструкцій», ІЕЗ ім. С. О. Патона НАН України, Київ.
7. Векслер Е. Я., Замекула И. В., Толстов В. Ю., Семешко Е. В. (2010) Технология диагностирования и оценка остаточного ресурса паропроводов высокого давления тепловых электростанций по уровню микроповрежденности металла. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **1**, 23–31.
8. Мишакин В. В., Клошников В. А., Гончар А. В. (2015) Связь энергии деформации с коэффициентом Пуассона при циклическом нагружении аустенитной стали. *Журнал технической физики*, **85**, вып. 5, 32–36.
9. Петров А. И., Разуваева М. В. (2015) Оценка критерия взаимодействия пор в деформированных материалах. *Там же*, **85**, вып. 4, 130–133.
10. Степанова Л. В., Игонин С. А. (2014) Описание рассеянного разрушения: параметр поврежденности Ю. Н. Работнова: историческая справка, фундаментальные результаты и современное состояние. *Вестник СамГУ – Естественнонаучная серия*, **3** (114), 97–114.
11. Работнов Ю. Н. (1959) О механизме длительного разрушения. *Вопросы прочности материалов и конструкций*. Москва, Изд-во АН СССР, сс. 5–7.
12. Качанов Л. М. (1958) О времени разрушения в условиях ползучести. *Изв. АН СССР. ОТИ*, сс. 26–31.
13. Ерофеев В. И., Никитина Е. А. (2010) Самосогласованная динамическая задача оценки поврежденности материала акустическим методом. *Акустический журнал*, **56**, **4**, 554–557.

14. Каштанов А. В., Петров Ю. В. (2006) Энергетический подход к определению мгновенной поврежденности. *Журнал технической физики*, **76**, вып. 5, 71–75.
15. Муравьев В. В., Зуев Л. Б., Комаров К. Л. (1996) *Скорость звука и структура стали и сплавов*. Москва, Наука.
16. Зайцев В. Ю., Назаров В. Е., Таланов В. И. (2006) «Неклассические» проявления микроструктурно-обусловленной нелинейности: новые возможности для акустической диагностики. *Успехи физических наук*, **1**, 97–102.
17. Birring A. S., Bartlett M. L., Kawano K. (1989) Ultrasonic Detection of Hydrogen Attack in Steels. *Corrosion (National Association of Corrosion Engineers)*, **45**, 3.
18. Hirsekorn S., Van Andel P. W., Netzelmann U. (1998) Ultrasonic Methods to Detect and Evaluate Damage in Steel. *NDT & E.*, **15:6**, 373–393;
19. Kot R. (2001) *Hydrogen Attack, Detection, Assessment and Evaluation. 10th APCNDT*. <http://www.ndt.net/apcndt2001/papers/1154/1154.htm>
20. Molika Nardo R., Cerniglia D., Lombardo P. et al. (2016) Detection, characterization and sizing of hydrogen induced cracking in pressure vessels using phased array ultrasonic data processing. *21st European Conference on Fracture, ECF21, 20–24 June 2016, Catania, Italy*. *Procedia Structured Integrity*, **2**, 581–588.
21. <http://www.williamsublishing.com/PDF/5-8459-0710-1/part.pdf>.
22. Исмару А. (1981) *Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах*. т. 1. Москва, Мир.
23. Ермолов И. Н., Алешин Н. П., Потапов А. И. (1991) Кн. 2. Акустические методы контроля: практ. пособие. Сухоруков В. В. (ред.) *Неразрушающий контроль*. В 5 кн. Москва, Высшая школа.
24. Спивак Л. В. (2008) Синергические эффекты деформационного отклика в термодинамически открытых системах металл-водород. *Успехи физических наук*, **178**, **9**, 897–922.
25. <http://energyfirefox.blogspot.com/2012/02/boxplot.html>.

References

1. Rodyushkin V. M. (2009) ot poiska defektov k poisku preddefektnogo sostoyaniya. *Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya*, **4**, 51–56.
2. Kozinkina A. I., Rybakova L. M., Berezin A. V. (2006) Otsenka stepeni mikrorazrusheniya pri deformatsii metallicheskikh materialov. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, **72**, **4**, 39–42.
3. Bobyr N. I., Babenko A. Ye., Khalimon A. P. (2008) Kontinualnaya mekhanika povrezhdennosti i yee ispolzovaniye v zadachakh slozhnogo malotsiklovogo nagruzheniya. *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchy kontrol*, **4**, 25–34.
4. Lebedev A. A. (2008) Novye kharakteristiki degradatsii materiala na stadii razvitiya rasseyannykh povrezhdeniy. *Tam zhe*, **4**, 35–44.
5. Nedoseka S. A., Nedoseka A. Ya. (2010) . Integrated assessment of damage level and residual life of metals with certain operating life. *Tam zhe*, **1**, 9–16.
6. Nedosiaka S. A. (2010.) Diahnostyka i prohnozuvannia resursu zvarykh konstrukttsii metodom akustychnoi emisii. AR d-ra tekhn. nauk po spets. 05.02.10 «Diahnostyka materialiv i konstrukttsii», IEZ im. Ye. O. Patona NAN Ukrainy, Kyiv.
7. Veksler Ye. Ya., Zamekula I. V., Tolstov V. Yu., Semeshko Ye. V. (2010) Technology of diagnostics and assessment of residual life of high-pressure steam pipelines of thermal power plants by the level of metal microdamage. *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchy kontrol*, **1**, 23–31.
8. Mishakin V. V., Klyushnikov V. A., Gonchar A. V. (2015) Svyaz energii deformatsii s koeffitsiyentom Puassona pri tsiklicheskom nagruzhenii austenitnoy stali. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, **85**, вып. 5, 32–36.
9. Petrov A. I., Razuvayeva M. V. (2015) Otsenka kriteriya vzaimodeystviya por v deformirovannykh materialakh. *Tam zhe*, **85**, вып. 4, 130–133.
10. Stepanova L. V., Igonin S. A. (2014) Opisaniye rasseyannogo razrusheniya: parametr povrezhdennosti Yu. N. Rabotnova: istoricheskaya spravka, fundamentalnye rezultaty i sovremennoye sostoyaniye. *Vestnik SamGU – Yestestvenno-nauchnaya seriya*, **3(114)**, 97–114.
11. Rabotnov Yu. N. (1959) O mekhanizme dlitel'nogo razrusheniya. *Voprosy prochnosti materialov i konstrukttsy*. Moskva, Izd-vo AN SSSR, ss. 5–7.
12. Kachanov L. M. (1958) O vremeni razrusheniya v usloviyakh polzuchesti. *Izv. AN SSSR. OTN*, ss. 26–31.
13. Yerofeyev V. I., Nikitina Ye. A. (2010) Samosoglasovannaya dinamicheskaya zadacha otsenki povrezhdennosti materiala akusticheskimi metodami. *Akusticheskiy zhurnal*, **56**, **4**, 554–557.
14. Kashtanov A. V., Petrov Yu. V. (2006) Energeticheskiy podkhod k opredeleniyu mgnovnoy povrezhdennosti. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, **76**, вып. 5, 71–75.
15. Muravyev V. V., Zuyev L. B., Komarov K. L. (1996) *Скорость звука и структура стали и сплавов*. Москва, Наука.
16. Zaytsev V. Yu., Nazarov V. Ye., Talanov V. I. (2006) «Неклассические» проявления микроструктурно-обусловленной нелинейности: новые возможности для акустической диагностики. *Успехи физических наук*, **1**, 97–102.
17. Birring A. S., Bartlett M. L., Kawano K. (1989) Ultrasonic Detection of Hydrogen Attack in Steels. *Corrosion (National Association of Corrosion Engineers)*, **45**, 3.
18. Hirsekorn S., Van Andel P. W., Netzelmann U. (1998) Ultrasonic Methods to Detect and Evaluate Damage in Steel. *NDT & E.*, **15:6**, 373–393;
19. Kot R. (2001) *Hydrogen Attack, Detection, Assessment and Evaluation. 10th APCNDT*. <http://www.ndt.net/apcndt2001/papers/1154/1154.htm>
20. Molika Nardo R., Cerniglia D., Lombardo P. et al. (2016) Detection, characterization and sizing of hydrogen induced cracking in pressure vessels using phased array ultrasonic data processing. *21st European Conference on Fracture, ECF21, 20–24 June 2016, Catania, Italy*. *Procedia Structured Integrity*, **2**, 581–588.
21. <http://www.williamsublishing.com/PDF/5-8459-0710-1/part.pdf>.
22. Isimaru A. (1981) Rasprostraneniye i rasseyaniye voln v sluchayno-neodnorodnykh sredakh. t. 1. Moskva, Mir.
23. Yermolov I. N., Alechin N. P., Potapov A. I. (1991) Кн. 2. Акустические методы контроля: практ. пособиye. Sukhorukov V. V. (red.) *Неразрушающий контроль*. В 5 кн. Москва, Vysshaya shkola.
24. Spivak L. V. (2008) Sinergicheskiye efekty deformatsionnogo otklika v termodinamicheskii otkrytykh sistemakh metall-vodorod. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, **178**, **9**, 897–922.
25. <http://energyfirefox.blogspot.com/2012/02/boxplot.html>

Р. И. РОМАНИШИН, Я. Л. ИВАНИЦКИЙ,
В. В. КОШЕВОЙ, С. Т. ШТАЮРА, И. М. РОМАНИШИН,
О. М. МОКРЫЙ, П. М. СЕМАК

Физико-механический институт НАН Украины, 79060,
г. Львов, ул. Научная, 5. E-mail: pminasu@lviv.ua

**УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МЕТОД ОЦЕНКИ РАССЕЯННОЙ
ПОВРЕЖДЕННОСТИ МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ
ВОЗВРАТНО-РАССЕЯННОГО СИГНАЛА**

Предложен неразрушающий метод оценки рассеянной поврежденности в объеме материала на основе регистрации возвратно-рассеянного ультразвукового сигнала в виде А-скана. Изложены информационные технологии обработки возвратно-рассеянного сигнала и результаты экспериментальной апробации на образцах с разной степенью водородной поврежденности. Библиогр. 25, рис. 4.

Ключевые слова: рассеянная поврежденность, ультразвуковой возвратно-рассеянный сигнал, статистическая обработка, дисперсия, В-скан

R. I. ROMANISHIN, YA. L. IVANITSKII, V. V. KOSHOVYI,
S. T. SHAYURA, I. M. ROMANISHIN, O. M. MOKRYI,
P. M. SEMAK

Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine.
5 Naukova str., Lviv, 79060, E-mail: pminasu@lviv.ua

ULTRASONIC METHOD OF EVALUATION OF DIFFUSED
MATERIAL DAMAGE BASED ON BACK-SCATTERED
SIGNAL

Non-destructive method volume based on recording of back-

scattered ultrasonic signal in from of A-scan was proposed for evaluation of diffused damage in metal. Informative technologies of processing of back-scattered signal and results of experimental testing on samples with different level of hydrogen damage were presented. Ref. 25, Figures 4

Keywords: diffused damage, ultrasonic back-scattered signals, statistical processing, dispersion, B-scan

Надійшла до редакції
23.03.2017

XVI МЕЖДУНАРОДНЫЙ ПРОМЫШЛЕННЫЙ ФОРУМ – 2017

МЕЖДУНАРОДНЫЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ВЫСТАВКИ

 МЕТАЛЛО-ОБРАБОТКА	 УКРСВАРКА	 УКРВТОР	 УКРПРОМ АВТОМАТИЗАЦИЯ	 БЕЗОПАСНОСТЬ ПРОИЗВОДСТВА
 ГИДРАВЛИКА ПНЕВМАТИКА	 ПОДШИПНИКИ	 УКРЛИТЬЕ	 ОБРАЗЦЫ, СТАНДАРТЫ, ЭТАЛОНЫ, ПРИБОРЫ	 ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНОЕ СКЛАДСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ





ОРГАНИЗАТОР:
Международный выставочный центр

Генеральный информационный партнер: 	Технический партнер: 
--	---

21-24

НОЯБРЯ

	☎ +38 044 201-11-65, 201-11-56, 201-11-58 e-mail: maria@iec-expo.com.ua www.iec-expo.com.ua, www.mvc.ukr www.tech-expo.com.ua	МЕЖДУНАРОДНЫЙ ВЫСТАВОЧНЫЙ ЦЕНТР Украина, Киев, Броварской пр-т, 15 М "Левобережная"
---	--	--

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ТЕХНІЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ КОЖУХОТРУБНИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ ДЛЯ РАНЖУВАННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ДЕФЕКТІВ ТА ОЦІНКИ ЇХ ВПЛИВУ НА ЗАЛИШКОВИЙ РЕСУРС

М. Д. РАБКІНА, А. О. ПЕРЕПІЧАЙ, І. І. ПЕРЕПІЧАЙ, В. В. МУТАС

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

Наведено аналіз результатів багаторічного технічного діагностування апаратів нафтопереробного комплексу з ціллю встановлення типопредставника обладнання для розрахунку на циклічну міцність. Методом скінченних елементів встановлено вплив місцевого корозійного дефекту, розташованого в області навколо патрубку, на циклічну міцність кожухотрубного теплообмінника при дії робочих навантажень. Бібліогр. 12, табл. 1, рис. 7.

Ключові слова: технічна діагностика, кожухотрубний теплообмінник, місцева корозія, циклічна міцність

Згідно з діючими нормативними документами моніторинг обладнання нафтопереробного комплексу ретельно проводиться на протязі всього періоду його експлуатації [1–4]. Нажаль існує велика кількість посудин і апаратів, які на даний час вичерпали свій проектний ресурс та потребують заміни. Але тим не менше, значна частина з них залишається в дії, у зв'язку з чим постає питання безпечного продовження її експлуатації. Світовий досвід показує, що найбільш уразливими серед подібних конструкцій постають теплообмінні апарати, термін служби яких індивідуальний (від одного до тридцяти років), навіть в рамках одного підприємства, оскільки вони постійно ремонтувались, змінювались, вводились нові і т. і. [5–8]. Крім того, зусиллям спеціалістів ІЕЗ ім. Є. О. Патона на протязі останніх 25 років регламентне обстеження стану ряду об'єктів свідчить про певні закономірності повторного утворення дефектів, особливо в найбільш поширених, порівняно з іншими видами теплообмінників, кожухотрубних апаратах – підігрівачах і ребойлерах, холодильниках і конденсаторах, випарювачах і трубних пучках. Саме вони, з діаметрами обичайок переважно 800...1100 мм, є основою парку теплообмінного обладнання. Застосовуються також з діаметрами 1400...2000 мм і вище. При цьому товщина стінки становить 12...18 мм, а в апаратах по гідроочищенню сягає 20...60 мм.

Кожухотрубний апарат, як відомо, являє собою тонкостінну оболонкову конструкцію, всередині якої знаходиться трубний пучок, закріплений з двох боків в трубні решітки. Теплообмін проходить за рахунок різниці в температурах продуктів що циркулюють в міжтрубному та трубному просторах і таким чином відбувається охолодження

або підігрів продукту на виході з теплообмінника згідно з регламентованим режимом. В більшості випадків температурний режим технологічних середовищ, що беруть участь в процесі теплообміну, становить від 50 до 330 градусів. При виробництві масел – від 25 до 85 градусів.

Щодо тиску, то з цього боку переробку нафти можна поділити на такі групи: до 1 МПа (10 атм.), від 1 до 2,5 МПа (10...25 атм.) і від 2,5 до 4 МПа (25...40 атм.).

Аналіз результатів моніторингу тривалої експлуатації 380 кожухотрубних теплообмінників, типова вибірка яких наведена в таблиці, включаючи вплив агресивного середовища, високих температур та тиску (тиск варіює в межах від 0,3 до 6,4 МПа), свідчить про виникнення в металі специфічних дефектів, крім тих, що пов'язані з процесами виготовлення конструкції в допустимих нормах межах, зокрема із зварюванням. Особливий вплив на працездатність несуть експлуатаційні дефекти – поверхнева і воднева корозія, корозійне розтріскування і міжкристалітна корозія, зміна хімічного складу і механічних властивостей, включаючи повзучість металу.

В цілому аналіз матеріалів, що підлягали періодичному технічному діагностуванню на наявність в них експлуатаційних дефектів (таблиця), свідчить про те, що типовими дефектами в теплообмінних апаратах із низьколегованих та вуглецевих сталей (основна кількість апаратів) є корозійні виразки (рис. 1), а з двохшарових – міжкристалітна корозія (рис. 2). В окремих випадках виявлено корозійні руйнування трубного пучка в зоні приварки до трубної решітки (рис. 3).

Для встановлення небезпечного з точки зору циклічної міцності перерізу теплообмінника

Деякі результати технічного діагностування кожухотрубних теплообмінників (вибірка)

Апарат	Температура, °С	Тиск, МПа	Середовище	Дата введення в експлуатацію	Матеріал	Основні розміри, мм	Окремі відомості про пошкодження та ремонту
Первинна переробка							
1Т	1. < 270 2. < 200	1...1,6 2...1,6	1 – ДП 2 – НФ	1993	09Г2С 16ГС	Ø1000×16 Ø1100×18	2011 – заварка корозійних виразок на внутрішній і зовнішній поверхнях обичайок корпусу
2Т	1. < 220 2. < 340	1...1,6 2...1,6	1 – НФ 2 – ДП	1995	09Г2С 16ГС	Ø1000×18 Ø1100×20	2000 – заміна трубного пучка; 2001 – заварка тріщини в кільцевому шві кришки корпусу; 2003 – заварка двох пор в поздовжньому шві кришки корпусу
3Т	1. < 100 2. < 100	1...1,6 2...1,6	1 – Б 2 – ЗВ	1968	Ст.3сп 16ГС	Ø1600×12 Ø1400×14	1995 – заміна дефектних перегородок і ремонт корозійних виразок на обичайці розподільчої камери (р/к.); 1996 – заміна трубного пучка; 2005 – корозійні виразки Ø від 10 до 60 мм, глибиною до 6,0 мм на внутрішній поверхні денця плавголовки з боку трубного пучка; механічний знос шестигранників пробок муфт 3/4"; корозійний знос різьби муфти і пробки 3/4"; заварка корозійних виразок на денці плавголовки; заварка корозійних виразок Ø до 30,0мм і глибиною до 5,0 мм на р/к; заміна двох дефектних перегородок обичайки р/к; заміна верхнього дефектного штуцера на обичайці р/к
4Т	1. < 100; 2. < 45;	1...0,95 2...0,3	1 – Б 2 – ЗВ	1983	16ГС 09Г2С	Ø 1400 × 14 Ø 1600 × 14	1995 – заміна дефектних перегородок плавголовки; 2002 – заварка корозійних виразок на денці плавголовки; ремонт розшарування на обичайці кришки ковпака Ø 200,0 мм, глибиною 4,7 мм шляхом вибірки і подальшого наплавлення
5Х	1. < 60 2. < 45	1...1,1 2...0,6	1 – Б 2 – ЗВ	1994	09Г2С Сталь 20	Ø1000×14 Ø1100×16	2013 – ремонт різьбових муфт штуцера р/к і денця кришки корпусу; – усунення дефекту на обичайці корпусу
6Х	1. < 150 2. < 45	1...1,2 2...0,6	1 – НФП 2 – ЗВ	1972	Ст.3 16ГС	Ø1000×12 Ø1145×50	2011 – ремонт різьбових муфт (2 шт.), заварка тріщин в поздовжньому зварному шві обичайки корпусу
7Х	1. < 200 2. < 120	1...1,2 2...1,6	1 – Б 2 – НФ	1993	09Г2С 16ГС	Ø1000×12 Ø1100×18	2011 – ремонт перегородок обичайки і денця р/к; 2013 – заварка пор в шві приварки різьбової муфти до денця кришки корпусу
Вторинна переробка							
8Т	1. 100 2. 350	1...1,1 2...6,4	1 – П 2 – П	1976	12ХМ + 08Х18Н10Т	Ø1300×60 Ø1500×20	2002 – тріщини в плакуючому шарі денця і нища штуцерів р/к. 2004 – інтенсивна МКК в плакуючому шарі фланців р/к (до 7,5 мм) і місцями твердість, що значно перевищує бракувальний рівень
Товарне виробництво							
9Т	1. 45...85 2. 25...45	1...1,9 2...0,6	1 – ПП 2 – ЗВ	1997	09Г2С + 12Х18Н10Т	Ø1400×16; Ø1400×22	2010 – заварка пор і раковин в зварних швах апарата, ремонт пошкоджень плакуючого шару обичайок корпусу; заміна зношених різьбових муфт вварених в патрубку штуцерів
Скорочення: 1 – міжтрубний простір (корпус); 2 – внутрішньотрубний простір; Б – бензин; ЗВ – зворотна вода; ДП – дизельне паливо; НФ – нафта; П – пальне; ПП – пари пропану; НФП – нафтопродукт.							



Рис. 1. Корозійні виразки на денці плавголовки теплообмінника зі сталі 16ГС

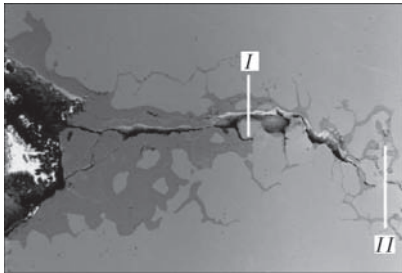


Рис. 2. Міжкристалітна тріщина в плакуючому шарі двохшарової сталі 12XM+08X18N10T



Рис. 3. Корозійні виразки (червоні стрілки) і відкладення (жовті стрілки) в нижній частині трубного пучка зі сталі 15X5M

(рис. 4) було запропоновано виділити типового представника, а далі провести розрахунок методом скінченних елементів корпусу апарату та визначити напружено-деформований стан при згаданих вище робочих параметрах.

Ранжування теплообмінників для вибору типового представника проводилося серед апаратів, виготовлених з низьковуглецевих низьколегованих сталей з корозійними пошкодженнями. Воно здійснювалось за допомогою фільтрації основного масиву вибірки за наступними характеристиками – геометричні розміри та робочі параметри. Пріоритет надавався саме геометрії: діаметр та товщина стінки, а робочі параметри: температура та внутрішній тиск приймалися максимально можливими для обраного за геометричними розмірами апарату.

В результаті ранжування отримано типопредставник, виготовлений зі сталі 17ГС з товщиною стінки 16 мм та діаметром обичайки корпусу 1000 мм. Розрахункові робочі параметри апарату: внутрішній тиск 2,5 МПа та температура 270 °С.

Результати скінченно-елементного моделювання свідчать про те, що небезпечним перерізом

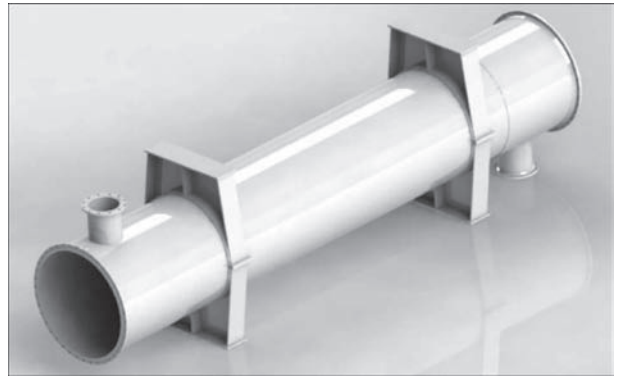


Рис. 4. Геометрична модель апарату

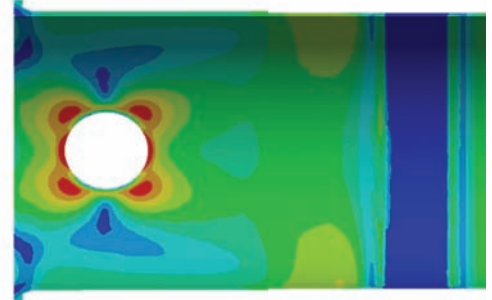
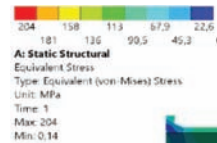


Рис. 5. Розподіл еквівалентних напружень навколо патрубку апарату

конструкції теплообмінника при дії робочих навантажень є область навколо патрубків (рис. 5). Еквівалентні напруження в стінці корпусу навколо патрубку (рис. 6) сягають значень 204 МПа тобто межі текучості матеріалу при робочій температурі 270 °С.

Циклічна міцність теплообмінника за даних умов визначена на основі кривої втоми [9] з корекцією середніх напружень по методиці Gerber [10] з врахуванням пластичних властивостей матеріалу [11]. В результаті встановлено, що типовий представник із заданими робочими параметрами безвідмовно зможе працювати близько 44 тис. циклів (рис. 6). Даний результат повністю покриває весь розрахунковий період експлуатації апарату.

Для оцінки впливу корозійного дефекту на циклічну міцність типопредставника застосовано підхід по схематизації корозійного дефекту за допомогою напівеліптичної тріщини, описаний в роботі [12]. Тріщина великою піввіссю вздовж осі апарату розташована в припатрубковій області в зоні дії високих кільцевих напружень. В результаті розрахунку отримано значення близько 13,5 тис. циклів, що в 3,25 разів менше, ніж в варіанті без дефекту (рис. 7).

Таким чином, на підставі аналізу результатів багаторічного досвіду технічної діагностики встановлено, що найпоширенішими дефектами, які

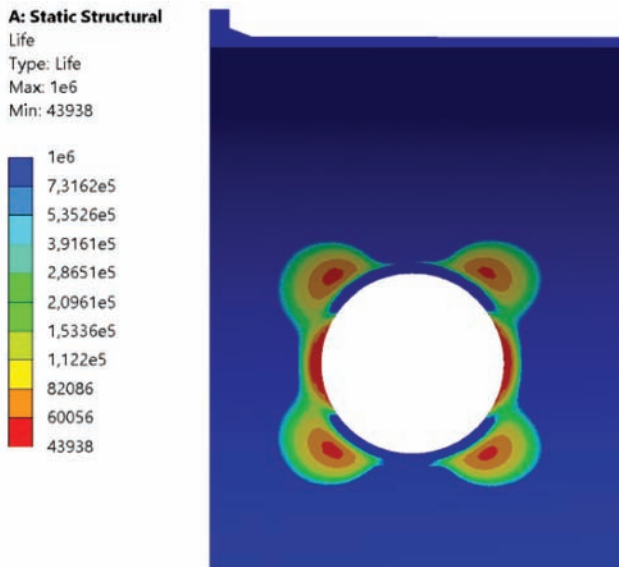


Рис. 6. Кількість циклів до руйнування без дефекту

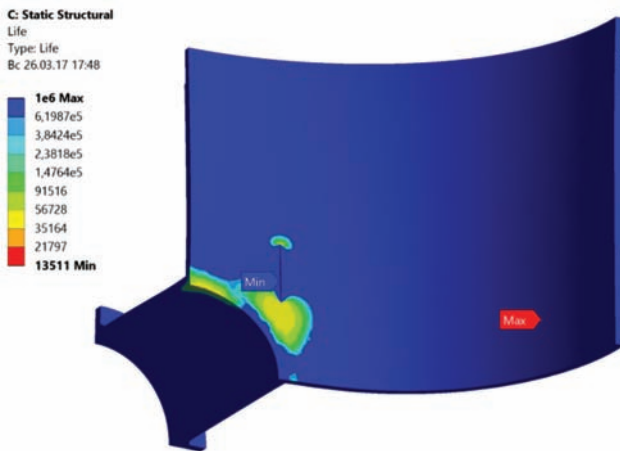


Рис. 7. Кількість циклів до руйнування із схематизованим корозійним дефектом

мають місце при тривалій експлуатації кожухотрубних теплообмінників на різних стадіях технологічного процесу є поверхневі корозійні виразки в апаратах із низьколегованих та вуглецевих сталей, а з двохшарових теплостійких і корозійностійких сталей міжкристалічна корозія. При цьому горизонтальні посудини схильні до значних корозійних пошкоджень саме в нижній частині, як на внутрішній поверхні кожуха, так, власне, і на трубному пучку.

Для виявлення найнебезпечнішої ділянки, в якій поява корозійної виразки може в цілому призвести до відмови апарату, обрано найбільш розповсюджений, виходячи з геометричних та експлуатаційних параметрів, тип теплообмінника.

Методом скінчених елементів розраховано напруження, які виникають в даному теплообміннику від робочих навантажень за відсутності пошкоджень та з наявним корозійним дефектом, що схематизується згідно НД [12] як напівеліптична тріщина.

Показано, що місце, в якому поява дефекту типу виразкова корозія є найбільш небезпечно

– це припатрубкова область. Встановлено, що апарат з таким дефектом в цій зоні витримує в 4 рази менше циклів робочих навантажень, ніж без дефекту.

В подальшому планується визначити циклічну міцність апарату з завареним дефектом а також оцінити вплив декількох варіантів накладання зварних швів на статичну та циклічну міцність теплообмінного апарату.

Список літератури

1. ДНАОП 1.3.00-8.02-93 (1993) Методические указания «Проведение работ по оценке остаточной работоспособности технологического оборудования нефтеперерабатывающих, нефтехимических и химических производств». г. Киев.
2. ДНАОП 0.00-1.07-94 «Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением».
3. ДСТУ 4046-2001 «Оборудование технологическое нефтеперерабатывающих, нефтехимических и химических производств. Техническое диагностирование. Общие технические требования».
4. (1998) Технические указания – регламент по эксплуатации оборудования установок каталитического риформинга и гидроочистки, работающих в водородосодержащих средах при повышенных температуре и давлении. АООТ «ВНИИНефтехим», АООТ «ВНИИНефтемаш».
5. Назначение и классификация теплообменных аппаратов. <https://openedu.urfu.ru/files/book/Глава%201.html>
6. Технология ремонта теплообменных аппаратов. http://www.krmagazine.ru/Holodilnye_ustanovki_holodilnye_kamery_ekspluatatsiya_i_remont/p2_articleid/3288
7. Теплообменное оборудование в нефтегазовой промышленности. http://newchemistry.ru/letter.php?n_id=5873
8. Перепічай І. І., Перепічай А. О., Рабкіна М. Д., Мутас В. В. (2017) Розроблення технології відновлювального ремонту зварюванням кожухотрубних теплообмінників. Матеріали 17-го Міжнародного науково-технічного семінара «Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте» (20–24 лютого 2017 р., м. Свалява, Карпати)», сс. 211–214.
9. ПНАЭ Г-7-002-86 Правила и нормы в атомной энергетике. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (разделы 1–5, Приложения 1–3)
10. Xiaolin Chen, Yijun Liu. (2014) *Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench*. CRC Press.
11. А. С. Зубченко (ред.) (2003) *Марочник сталей и сплавов: 2-е изд. доп. и испр.* Москва, Машиностроение.
12. ВБН В.2.3-00018201.04-2008 Держнафтогазпром України. *Розрахунки на міцність діючих магістральних трубопроводів з дефектами.*

References

1. ДНАОП 1.3.00-8.02-93 (1993) Metodicheskiye ukazaniya «Provedeniye rabot po otsenke ostatnochnoy rabotosposobnosti tekhnologicheskogo oborudovaniya neftepererabatyvayushchikh, neftekhimicheskikh i khimicheskikh proizvodstv». g. Kiyev. [in Russian].
2. ДНАОП 0.00-1.07-94 «Pravila ustroystva i bezopasnoy ekspluatatsii sosudov, rabotayushchikh pod davleniyem».
3. DSTU 4046-2001 «Oborudovaniye tekhnologicheskoye neftepererabatyvayushchikh, neftekhimicheskikh i khimicheskikh proizvodstv. Tekhnicheskoye diagnostirovaniye. Obshchiye tekhnicheskkiye trebovaniya». [in Russian].
4. (1998) *Tekhnicheskkiye ukazaniya – reglament po ekspluatatsii oborudovaniya ustanovok kataliticheskogo riforminga i gidroochistki, rabotayushchikh v vodorodosoderzhashchikh sredakh pri povyshennykh temperature i davlenii.* АООТ «ВНИИНефтехим», АООТ «ВНИИНефтемаш». [in Russian].
5. *Naznacheniyе i klassifikatsiya teploobmennyykh apparatov.* <https://openedu.urfu.ru/files/book/Glava%201.html>. [in Russian].

6. *Tekhnologiya remonta teploobmennykh apparatov*. http://www.krmagazine.ru/Holodilnye_ustanovki_holodilnye_kamery_ekspluatatsiya_i_remont/p2_articleid/3288. [in Russian].
7. *Teploobmennoye oborudovaniye v neftegazovoy promyshlennosti*. http://newchemistry.ru/letter.php?n_id=5873
8. Perepichai I. I., Perepichai A. O., Rabkina M. D., Mutas V. V. (2017) Rozroblennia tekhnolohii vidnovliualnoho remontu zvariuvanniam kozhukhotrubnykh teploobminnykiv. Materialy 17-ho Mezhdunarodnoho nauchno-tekhnycheskoho semynara «Sovremennye problemy proyzvodstva y remonta v promyshlennosti y na transporte» (20–24 liutoho 2017 r., m. Svaliava, Karpaty)», ss. 211–214. [in Ukrainian].
9. PNAE G-7-002-86 *Pravila i normy v atomnoy energetike. Normy rascheta na prochnost oborudovaniya i truboprovodov atomnykh energeticheskikh ustanovok* (razdely 1–5, Prilozheniya 1–3). [in Russian].
10. Xiaolin Chen, Yijun Liu. (2014) *Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench*. CRC Press.
11. A. S. Zubchenko (red.) (2003) *Marochnik staley i splavov*. 2-е izd. dop. i ispr. Moskva, Mashinostroyeniye. [in Russian].
12. VBN V.2.3-00018201.04-2008 Derzhnaftohazprom Ukrainy. *Rozrakhunky na mitsnist diiuchykh mahistralnykh truboprovodiv z defektamy*. [in Ukrainian].

М. Д. РАБКИНА, А. А. ПЕРЕПИЧАЙ, И. И. ПЕРЕПИЧАЙ,
В. В. МУТАС

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

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕХНИЧЕСКОГО
ДИАГНОСТИРОВАНИЯ КОЖУХОТРУБНЫХ
ТЕПЛООБМЕННИКОВ ДЛЯ РАНЖИРОВАНИЯ
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ
И ОЦЕНКИ ИХ ВЛИЯНИЯ
НА ОСТАТОЧНЫЙ РЕСУРС

Приведен анализ результатов многолетнего технического диагностирования аппаратов нефтеперерабатывающего комплекса с целью установления типопредставителя оборудования для расчета на циклическую прочность. Методом конечных элементов установлено влияние местного коррозионного дефекта, расположенного в области вокруг патрубка, на циклическую прочность кожухотрубного теплообменника при действии рабочих нагрузок. Библиогр. 12, табл. 1, рис. 7.

Ключевые слова: техническая диагностика, кожухотрубный теплообменник, местная коррозия, циклическая прочность

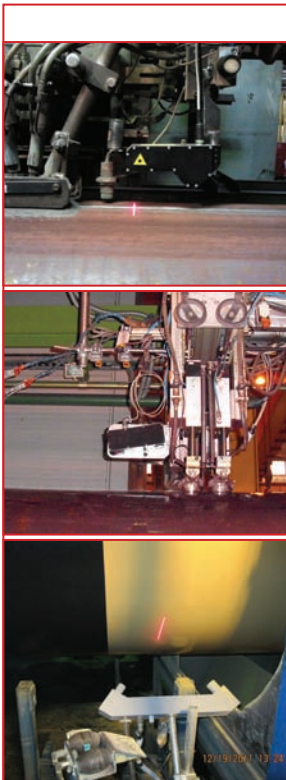
M. D. RABKINA, A. A. PEREPICHAY, I. I. PEREPICHAY,
V. V. MUTAS

E. O. Paton Electric Welding Institute of the NASU 11 Kazimir Malevich str., Kyiv-150, E-mail: office@paton.kiev.ua

Analysis of results of technical diagnostics of shell-and-tube heat exchangers for ranking of service defects and evaluation of their effect on residual life. The results of longstanding technical diagnostics of apparatuses of refining complex were analyzed for determination of typical representative of equipment for cyclic strength calculation. Finite element method was used for determination of the effect of local corrosion defect, located in the area around the nozzle, on cyclic strength of shell-and-tube heat exchanger at operating load action. Ref.12, Table 1, Figures 7

Keywords: technical diagnostics, shell-and-tube heat exchanger, local corrosion, cyclic strength

Надійшла до редакції
23.05.2017



АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

Лазерная система автоматического слежения за стыком для станов сварки продольных швов труб ROVICOR STS-200-NS

Система предназначена для автоматического слежения за центром стыка с разделкой кромок без заполнения или с частичным заполнением после технологического прохода при дуговой сварке или сварке под флюсом.

Лазерная система слежения за сварным швом при автоматизированном ультразвуковом контроле сварных труб ROVICOR SF-100

Система предназначена для автоматического слежения за центром валика усиления сварного шва при проведении автоматизированного ультразвукового контроля продольных сварных швов труб.

Система автоматического обнаружения валика усиления сварного шва и управления дозатором полимера при нанесении антикоррозионного покрытия на поверхность сварных труб ROVICOR SFS – P08

Система предназначена для обнаружения центра валика усиления шва при вращении трубы и формирования сигналов управления дозировкой полимера для обеспечения однородной толщины полимерного покрытия на готовой трубе (увеличение дозировки в момент нанесения полимера на сварной шов).

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

ОЦЕНКА МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В МЕТАЛЛЕ КОНТАКТНО-РЕЗИСТИВНЫМ МЕТОДОМ

В. М. КИСЛИЦЫН, С. А. ВОРОНИН

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

В результате проведенных экспериментов определена линейная зависимость электрического сопротивления стали от усилия растяжения в пределах упругих деформаций. Контактно-резистивным методом установлена возможность фиксации момента перехода металла в область пластической деформации. Библиогр. 12, табл. 1, рис. 3.

Ключевые слова: сварные конструкции, неразрушающий контроль, напряжения растяжения, электрическое сопротивление, контактно-резистивный метод

Вопросы совершенствования методики и аппаратуры для оценки остаточных напряжений в металле после различных видов технологической обработки всегда остаются в числе актуальных.

К наиболее перспективным методам оценки остаточных напряжений в сварных соединениях относится метод электронной спекл-интерферометрии [1], а для дефектоскопии и оценки остаточного ресурса сварных конструкций используют аппаратуру акустоэмиссионной диагностики, ультразвуковой дефектоскопии, дефектоскопы-томографы с трехмерными ультразвуковыми датчиками с последующим анализом параметров спектров импульсов упругих волн, феррозондовые методы магнитной дефектоскопии, тензорезистивный метод, использование зависимости скорости звука для оценки напряженно-деформированного состояния металла и другие методы [2–5].

Для диагностики состояния ряда ответственных конструкций в атомной энергетике, судостроении, на железнодорожном транспорте применяют также вихретоковый метод [6–9].

Основным преимуществом вихретокового метода неразрушающего контроля является возможность оценки состояния металла в поверхностных, наиболее нагруженных, слоях металла. Однако несколько последовательно протекающих процессов преобразования электрического поля в магнитное и обратно в электрическое снижают точность измерения и информативность результирующего сигнала из-за неконтролируемых потерь энергии при каждом преобразовании энергии.

В отличие от методов, основанных на косвенном измерении механических напряжений (по величине деформации), включая методы тензометрирования, непосредственное измерение электрического сопротивления контактным методом позволяет напрямую оценить напряженное состояние металла.

Впервые возможность использования измерения электрического сопротивления для выявления струк-

турных изменений в металле была успешно реализована полвека назад [10]. Развитие этого направления в настоящее время отражено в работах [11, 12].

Контактно-резистивный метод, также как и тензорезистивный, основан на зависимости электрического сопротивления металла от величины механических напряжений, но его преимущество состоит в непосредственном измерении локального сопротивления металла¹.

Принципиальная возможность практической реализации контактно-резистивного метода была обоснована в экспериментах, проведенных на образцах из стали 09ХГСЮЧ сечением 12×2 мм, помещенных между опорами на расстоянии 60 мм, при трехточечной схеме нагружения для формирования в образце напряжений растяжения. Прогиб образца фиксировали индикатором перемещения часового типа с ценой деления 10 мкм. Величину электрического сопротивления образца между точками присоединения измерительных зондов, расположенными на расстоянии 10 мм, считывали по шкале микроомметра типа М246.

Для стабилизации величины электрического сопротивления в зоне контакта измерительных зондов с металлом образца их присоединяли способом точечной контактной сваркопайки к стороне образца, подвергаемой напряжениям растяжения.

Результаты проведенных экспериментов, представленные на рис. 1, показывают принципиальную возможность использования одного из нескольких серийно выпускаемых микроомметров для выявления уровня напряженного состояния металла контактно-резистивным методом.

Результаты экспериментов по оценке изменения электрического сопротивления образцов стали Ст.3 в зависимости от усилия растяжения, проведенные на универсальной разрывной машине ZDM10, подтверждают линейную зависимость этого параметра от изменения механических напряжений в пределах 50...250 МПа.

¹Термин «локальное электрическое сопротивление» использован в данной работе в связи с отличием методики его измерения от методики измерения удельного электрического сопротивления.

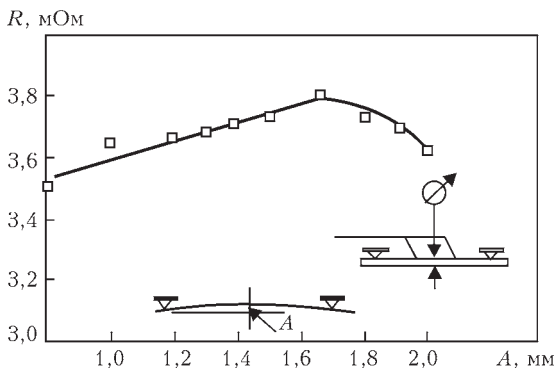


Рис. 1. Зависимость электрического сопротивления металла от величины прогиба образца, возникающего при его изгибе

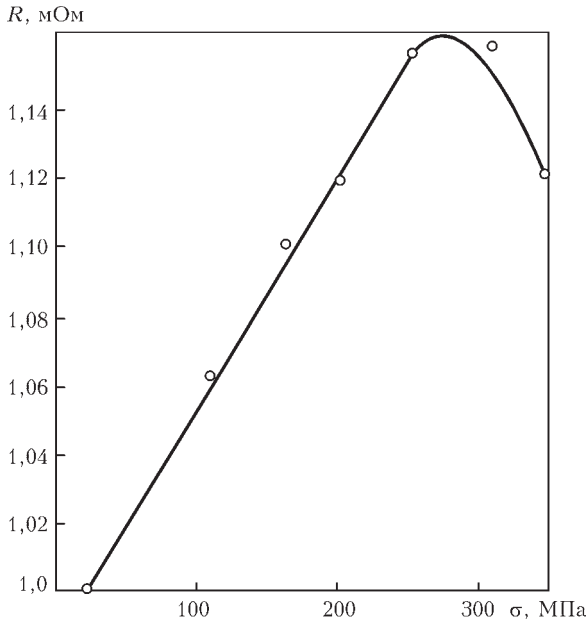


Рис. 2. Зависимость электрического сопротивления образца в виде прутка из стали Ст.3 диаметром 6 мм от напряжений растяжения

На рис. 2 и 3 приведены типичные графики зависимости электрического сопротивления от механических напряжений в испытуемом образце в единицах Ома и в условных единицах, пропорциональных омическому сопротивлению.

Исследования были проведены также на образцах из стали 15ХСНД длиной 160 мм прямоуголь-

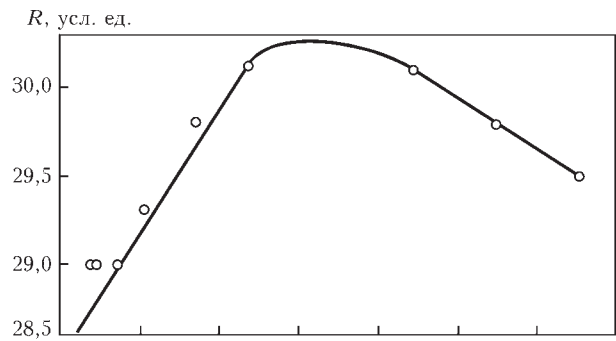


Рис. 3. Зависимость электрического сопротивления образца сечением 6×12 мм от величины напряжений растяжения

ного сечения 6×12 мм. В средней части образца были присоединены измерительные щупы микроомметра (аналогичного по устройству микроомметру М246) с выходом показаний на цифровой экран стандартного мультиметра.

Методика проведения эксперимента включала периодическое фиксирование прилагаемого к образцу усилия растяжения с соответствующим ему электрическим сопротивлением участка образца.

Изменение электрического сопротивления среднего участка образца в процессе проведения испытаний образца на растяжение приведено в таблице.

Данные таблицы позволяют составить представление о чувствительности контактно-резистивного метода измерения.

График изменения электрического сопротивления от величины созданных в образце механических напряжений представлен на рис. 3. Проведение эксперимента было прекращено до полного разрушения образца при увеличении его длины на 2,4 %.

Проведение измерений выявило одну из особенностей данного метода – возможность фиксирования момента перехода упругих деформаций в пластические.

Объяснение факта снижения величины электрического сопротивления после определенной степени деформации образца (как это следует из графиков на рис. 1–3, после достижения предела текучести металла) может быть основано на пред-

Соотношение основных параметров эксперимента

Номер измерения	Время (час, мин, сек.)	Нагрузка, Н	Электрическое сопротивление (усл. ед.)	Напряжение, МПа
2053	16.45.04	150	28,6	20,8
2054	16.45.22	295	29,0	40,9
2055	16.45.26	315	29,0	43,7
2056	16.45.32	525	29,0	72,9
2057	16.45.36	775	29,3	107,6
2058	16.45.40	1250	29,8	173,6
2059	16.45.44	1700	30,2	236,1
2060	16.45.46	2450	30,2	340,3
2061	16.45.50	3200	30,1	444,4
2062	16.45.52	3950	29,8	548,6
2063	16.45.56	4700	29,5	652,8

положении о формировании в металле образца линий Чернова–Людерса, способствующих возникновению новых ювенильных плоскостей контакта между зернами металла.

Полученные результаты указывают на перспективность разработки аппаратуры для оценки напряженно-деформированного состояния металла контактно-резистивным методом как для совершенствования неразрушающих методов контроля, так и для проведения исследований по прогнозированию остаточного ресурса сварных конструкций.

Список литературы

1. Лобанов Л. М., Пивторак В. А., Савицкий В. В., Ткачук Г. И. (2006) Методика определения остаточных напряжений в сварных соединениях элементов конструкций с использованием электронной спекл-интерферометрии. *Автоматическая сварка*, **1**, 25–30.
2. Аleshin Н. П. (2008) Современные средства неразрушающего контроля – основной инструмент оценки состояния конструкций. *Там же*, **11**, 54–62.
3. Жуков С. В., Копица Н. Н. (1998) Исследование полей механических напряжений в металлических конструкциях приборами «Комплекс-2». *Сб. научн. тр. отделения «Специальные проблемы транспорта» Рос. академии транспорта*, **3**, 214–222.
4. Зарезин А. А. (2003) *Разработка методики определения остаточных сварочных напряжений на основе метода пенетрации в сочетании с электронной спекл-интерферометрией*: дис. ... канд. техн. наук. Челябинск, 216.
5. Гузь А. Н., Мохорт Ф. Г., Гуша О. Н. (1974) *Основы ультразвукового неразрушающего метода определения напряжений в твердых телах*. Киев, Наукова думка, 108.
6. Дефектоскоп вихретоковый ЭМИТ-1М с датчиком <http://www.kvazar-ufa.com/product1174.html>
7. Sadek H. M. (1999) Latest development in NDE of heat exchangers and boiler tubes. *University of Qatar*, **8**, 181–183
8. Joon-Hyun Lee (2008) Application of NDE tool for Diagnostics on Ageing Degradation. *IAEA Workshop on Detection, research, management and monitoring of ageing factors*. Buenos Aires, Argentine. 9–12 Dec.
9. Brauer H., Ziolkowski M., Toepfer H. (2014) Defect Detection in Conducting Materials Using Eddy Current Testing Techniques. *Serbian Journal of Electrical Engineering*, **11**, **4** (spec. iss.), 535–549.
10. Макара А. М., Новикова Д. П. (1967) Об особенностях мартенситного и бейнитного превращений в легированных сталях при сварочных термомеханических циклах. *Автоматическая сварка*, **10**, 10–15.
11. Ульбин А. В. (2010) *Метод измерения электрического сопротивления для контроля механических напряжений в стальных конструкциях*: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПбГПУ.
12. Ульбин А. В., Кукушкина Г. А. (2010) Особенности применения резистивного электроконтактного метода для контроля напряженно-деформированного состояния стальных конструкций. *Инженерно-строительный журнал*, **3**, 32–34.
4. Zarezin A. A. (2003) *Разработка методики определения остаточных сварочных напряжений на основе метода пенетрации в сочетании с электронной спекл-интерферометрией*: дис. ... канд. техн. наук. Челябинск, 216. [in Russian].
5. Guz A. N., Mokhort F. G., Gushcha O. N. (1974) *Osnovy ultrazvukovogo nerazrushayushchego metoda opredeleniya napryazheny v tverdykh telakh*. Kiyev, Naukova dumka, 108. [in Russian].
6. Defektoskop vikhretokovy EMIT-1M s datchikom <http://www.kvazar-ufa.com/product1174.html>. [in Russian].
7. Sadek H. M. (1999) Latest development in NDE of heat exchangers and boiler tubes. *University of Qatar*, **8**, 181–183
8. Joon-Hyun Lee (2008). Application of NDE tool for Diagnostics on Ageing Degradation. *IAEA Workshop on Detection, research, management and monitoring of ageing factors*. Buenos Aires, Argentine, 9–12 Dec.
9. Brauer H., Ziolkowski M., Toepfer H. (2014) Defect Detection in Conducting Materials Using Eddy Current Testing Techniques. *Serbian Journal of Electrical Engineering*, **11**, **4** (spec. iss.), 535–549.
10. Makara A. M., Novikova D. P. (1967) Ob osobennostyakh martensitnogo i beynitnogo prevrashcheny v legirovannykh stalyakh pri svarochnykh termodeformatsionnykh tsiklakh. *Avtomaticheskaya svarka*, **10**, 10–15. [in Russian].
11. Ulybin A. V. (2010) *Metod izmereniya elektricheskogo soprotivleniya dlya kontrolya mekhanicheskikh napryazheny v stalnykh konstruktziyakh*: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. – SPbGPU. [in Russian].
12. Ulybin A. V., Kukushkina G. A. (2010) Osobennosti primeneniya rezistivnogo elektrokontaktnogo metoda dlya kontrolya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya stalnykh konstruktzy. *Inzhenerno-stroitelny zhurnal*, **3**, 32–34. [in Russian].

В. М. КИСЛИЦИН, С. О. ВОРОНИН

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

ОЦІНКА МЕХАНІЧНОЇ НАПРУГИ В МЕТАЛІ КОНТАКТНО-РЕЗИСТИВНИМ МЕТОДОМ

В результаті проведених експериментів визначена лінійна залежність електричного опору сталі від зусилля розтягування в межах пружних деформацій. Контактно-резистивним методом встановлена можливість фіксації моменту переходу металу в область пластичної деформації. Бібліогр. 12, табл. 1, рис. 3.

Ключові слова: зварні конструкції, неруйнівний контроль, напруги розтягнення, електричний опір, контактний-резистивний метод

V. M. KISLITSYN, S. A. VORONIN

E. O. Paton Electric Welding Institute of the NASU
11 Kazimir Malevich str., Kyiv-150, E-mail: office@paton.kiev.ua

EVALUATION OF MECHANICAL STRESSES IN METAL USING CONTACT RESISTANCE METHOD

The results of carried investigation were used for determination of linear dependence of electric resistance of steel on tensile loads within the elastic deformation limits. Possibility of registration of moment of metal transfer to plastic deformation area was determined using the contact resistance method. Ref. 12, Table 1, Figures 3

Keywords: welded structures, non-destructive testing, tensile stresses, electric resistance, contact resistance method

Поступила в редакцию 21.03.2017

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ И ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ УГОЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Э. С. КРЫЛОВ, В. А. КУЛИШ

ГП «Институт «УкрНИИпроект» Минэнергоугля Украины. 03142, г. Киев, просп. Акад. Палладина 46/2.

E-mail: ukrndipr@ukr.net

Для стальных технологических трубопроводов угольных предприятий разработана комплексная оценка их технического состояния по бальной системе. В качестве критериев оценки использованы факторы, влияющие на техническое состояние трубопроводов. Разработан и испытан комплекс акустико-эмиссионного контроля КАРАТ для обнаружения утечек, а также выявления в металле трубы развивающихся под нагрузкой дефектов типа трещин. По результатам исследований разработан отраслевой стандарт ГСТУ 101.00174125.002–2003. Библиогр. 10, табл. 2, рис. 2.

Ключевые слова: технологический трубопровод, угольное предприятие, неразрушающий контроль, оценка технического состояния, отраслевой стандарт, акустическая эмиссия

Протяженность стальных технологических трубопроводов шахт (воды, пара, воздуха, шахтных вод и др.), обогатительных фабрик (шламовой воды, флотохвостов, нефтепродуктов, агрессивных и токсичных материалов и т. д.), а также разрезов (на одном горном предприятии) исчисляется десятками (сотнями) километров, достигая 70 % протяженности технологических коммуникаций, а стоимость их сооружения составляет 1,5 % полной сметной стоимости предприятия [1].

Наиболее протяженными и ответственными являются для: шахт – трубопроводы водоотлива и воздуховода, а также водопроводы; обогатительных фабрик – трубопроводы технической, оборотной и шламовой воды, сжатого воздуха, чистой воды, флотохвостов и др.

Трубопроводные системы являются одними из наиболее распространенных объектов повышенной опасности, более половины из которых в угольной промышленности эксплуатируются более 30 лет (т. е. с истекшим нормативным сроком службы) в условиях отсутствия службы контроля их технического состояния. Это часто приводит к аварийным ситуациям (утечкам, разрывам трубопроводов и т. п.), которые отрицательно сказываются на техногенно-экологической безопасности.

В дополнение к этому развитие и реструктуризация угольной промышленности Украины оказывает значительное воздействие на трубопроводы, находящиеся в зоне влияния шахтных полей. Неравномерная осадка земной поверхности может вызывать изменения положения и напряженно-деформированного состояния трубопроводов, которые в отдельных сечениях могут достигать пре-

дельных состояний и, как следствие, привести к аварийной ситуации.

В табл. 1 на примере компаний «Краснолиманская» и «Ровенькиантрацит» приведены основные характеристики технологических трубопроводов угольных предприятий, виды их повреждений и ориентировочный срок службы.

Как видно из табл. 1, все трубопроводные системы характеризуются большой протяженностью и низким сроком службы, что в конечном счете определяет безопасность объектов угольной промышленности и материальные затраты на их эксплуатацию.

Поэтому систематический контроль технического состояния технологических трубопроводов на угольных предприятиях является очень актуальным и в части выполнения Законов Украины [2–6].

Актуальность этой проблемы отражена в Законе Украины «О трубопроводном транспорте» следующим образом:

а) «Предприятия, учреждения и организации трубопроводного транспорта обязаны обеспечивать диагностический контроль за состоянием трубопроводов действующими средствами согласно правилам технической эксплуатации и нормативным актам по диагностике»;

б) «Техническое переосвидетельствование объектов трубопроводного транспорта по достижении ими амортизационного срока службы в случае преждевременного старения, изношенности и частичной потери надежности и безопасности».

Основные повреждения и аварии трубопроводов, связанные с износом, коррозией и др. эксплуатационными дефектами металла, сварных соединений [7] и изоляционных покрытий, в настоящее время не могут быть своевременно предотвра-

Таблица 1. Характерные технологические трубопроводы угольных предприятий

Объект, в который входит трубопровод	Транспортируемое вещество	Диаметр, мм	Давление, МПа	Протяженность, км.	Виды повреждений (срок службы, лет)
Водоотливные установки шахты «Краснолиманская»	Техническая вода	325; 426	0,6...5,0	Более 2,0	Разрывы труб, утечки, утонение стенки, уменьшение проходного сечения в результате отложения солей
Продуктопроводы ЦОФ «Краснолиманская»	Техническая вода	108; 219; 325; 530	0,15...0,5	9,5	Утечки, утонение стенки, просадка линий трубопроводов (более 5)
	Магнетитовая суспензия	219	0,15...0,25	0,22	Утечки, утонение стенки (0,25...1,5)
	Оборотная и подрешетная вода, шлам, флотохвосты	219; 325; 426; 530	0,2...0,5	7,0	Утонение стенки, просадка линий трубопроводов, утечки (1...3)
Продуктопроводы ЦОФ «Комендантская»	Техническая вода	219; 325	0,3	10,7	Утонение стенки, утечки (2,0...2,5)
	Оборотная вода, шлам, хвосты	219; 325; 630	0,2...0,3	12,2	Утечки, утонение стенки (0,5...1,5)
	Техническая вода (водовод от Исаковского водохранилища до промплощадки ЦОФ)	425	3,0	33,0	Утечки, утонение стенки, разрывы труб (2,5...3,0)
Трубопроводы общего назначения	Пар, вода, газы, топливо, хладагенты	Варьируются в пределах требований НТД на трубопроводы общего назначения			Характерные повреждения изоляции, металла трубы, сварных соединений

щены, так как большинство энергомеханических служб угольных предприятий не оснащены современными средствами неразрушающего контроля (НК), позволяющими объективно проводить комплексное обследование и отсутствует нормативная база для его проведения.

При этом основными факторами, определяющими техническое состояние стальных трубопроводов, являются:

- состояние металла труб и качество сварных соединений;
- состояние и тип изоляционного покрытия;
- состояние электрохимической защиты (наличие на трубопроводах анодных и знакопеременных зон);

– герметичность трубопроводов.

В соответствии с этими факторами в ГП «Институт «УкрНИИпроект» разработаны для угольной отрасли критерии комплексной оценки технического состояния технологических трубопроводов (табл. 2) по аналогии с теми, которые ранее апробированы для газопроводов и тепловых сетей в жилищно-коммунальном хозяйстве.

Общая оценка технического состояния трубопровода (N_{Σ}) определяется по бальной системе путем суммирования оценок по основным критериям по формуле:

$$N_{\Sigma} = K_{\text{общ}} (B_1 + B_2 + B_3 + B_4 + B_5 + B_6 + B_7),$$

где $K_{\text{общ}} = K_1 + K_2 + K_3$; K_1, K_2, K_3 – весовые коэффициенты, которые учитывают для трубопро-

Таблица 2. Критерии комплексной оценки технического состояния трубопроводов

Наименование критерия оценки	Виды выявляемых дефектов (отклонений от нормы)	Метод контроля	Оценка критерия в баллах
Герметичность	Коррозия, трещины, повреждения сварных соединений	Опрессовка, акустико-эмиссионный (АЭ), проникающими веществами, газовый и др.	B_1
Изоляционное покрытие	Прилипаемость, хрупкость, трещины, оголение металла, расслаиваемость, влага под изоляцией и т. п.	Визуальный, надтрассовый электромагнитный	B_2
Металл трубы	Коррозия, абразивный износ	Визуальный, УЗК, толщинометрия	B_3
Сварные соединения	Трещины, непровар, раскрытие шва и т. п.	УЗК, АЭ, радиографический	B_4
Напряженно-деформированное состояние (НДС) металла	Деформация, изгиб, провисание и т. п.	Тензометрический, магнитоупругий	B_5
Коррозионная опасность	Наличие анодных и знакопеременных зон	Электрический	B_6
Электрохимическая защита (ЭХЗ)	Отсутствие ЭХЗ	Визуальный	B_7

водов соответственно факторы: «Назначение», «Месторасположение» и «Способ прокладки» и определяют допустимое значение $[N_{\Sigma}]$; B_1-B_7 – количество баллов, характеризующих оценку по соответствующему критерию.

Полученное в результате обследования трубопровода значение общей оценки N_{Σ} сравнивается с допустимым значением $[N_{\Sigma}]$ для соответствующего объекта.

Общая оценка технического состояния определяется по неравенству:

$N_{\Sigma} \geq [N_{\Sigma}]$ – удовлетворительное состояние трубопровода;

$N_{\Sigma} < [N_{\Sigma}]$ – неудовлетворительное состояние трубопровода.

Представленный подход к комплексной оценке технического состояния трубопроводов заложен в разработанный ГП «Институт «УкрНИИпроект» отраслевой стандарт ГСТУ 101.00174125.002–2003 «Правила обстежень, оцінка технічного стану технологічних трубопроводів вугільних підприємств» [8]. Используемые в настоящее время для контроля трубопроводов традиционные методы НК (радиографический, ультразвуковой, магнитный, в т. ч. с использованием внутритрубных снарядов) имеют ограниченную область применения в части обнаружения развивающихся в процессе эксплуатации дефектов типа трещин и зон значительных пластических деформаций металла и сварных соединений. АЭ метод контроля позволяет накапливать информацию о динамике возникновения и развития повреждений в металле непосредственно в процессе нагружения и деформирования объекта с последующей интегральной оценкой технического состояния. К тому же, обнаруженные с помощью АЭ дефекты (особенно трещины), являются развивающимися, т. е. особо опасными, поэтому при использовании этого метода вопрос о степени опасности дефектов решается автоматически.

В ГП «Институт «УкрНИИпроект» разработан, изготовлен и прошел испытания в стендовых и производственных условиях комплекс АЭ контроля трубопроводов КАРАТ (рис. 1).

Комплекс КАРАТ состоит из переносного компьютера класса Notebook, четырех датчиков, со-



Рис. 1. Общий вид комплекса КАРАТ

вмещенных с предварительными усилителями, устройства обработки, имитатора, аккумулятора, сетевого блока питания и комплекта кабелей.

Комплекс контроля КАРАТ предназначен для обнаружения в стальных трубопроводах утечек транспортируемого вещества, а также выявления в металле трубы развивающихся под нагрузкой дефектов типа трещин и значительных зон пластической деформации в местах утонения стенок трубы [9].

Разработанная аппаратная часть и программное обеспечение комплекса КАРАТ позволяют выполнять следующие основные функции:

- выявление и определение координат утечки вещества путем приема акустических сигналов в звуковом диапазоне частот, которые вызваны течью;
- выявление и определение координат подрастающих дефектов, или распространение значительной пластической деформации путем приема акустических сигналов в ультразвуковом диапазоне частот;
- проведение классификации дефектов, которые развиваются, по степеням их опасности.

На рис. 2 приведены образцы регистрации с помощью комплекса КАРАТ утечки воды из трубопровода и сигналов, принятых от имитатора АЭ.

Эффект от внедрения комплекса КАРАТ при оценке технического состояния технологических трубопрово-

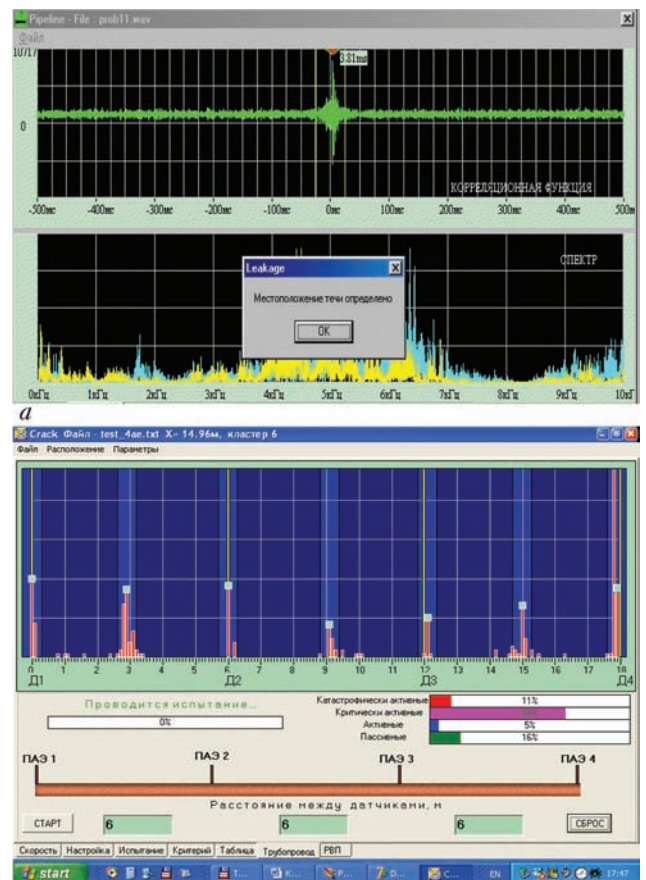


Рис. 2. Регистрация с помощью комплекса КАРАТ: утечки воды из трубопровода (а); сигналов АЭ (б)

дов промышленных предприятий и трубопроводов общего назначения достигается за счет:

- обеспечения безопасности эксплуатации трубопроводов;
- исключения и сокращения потерь теплоносителей и др. продуктов в результате предупреждения повреждений и аварий на ранней стадии развития дефектов;
- сокращения простоев оборудования во время обследования трубопроводов;
- исключения необходимости или сокращения объемов шурфования для обследования технического состояния металла и сварных соединений подземных трубопроводов;
- сокращения трудоемкости обследования трубопроводов по сравнению с традиционными методами НК, в результате отсутствия подготовительных операций (зачистка и др.) и уменьшения времени непосредственного контроля;
- неотключения потребителей во время обследования трубопроводов, которые могут контролироваться в процессе их эксплуатации;
- обоснованного планирования сроков и объемов работ, связанных с техническим обслуживанием и ремонтом трубопроводов по их фактическому техническому состоянию.

В результате, использование в практике обследования и паспортизации технологических трубопроводов комплексной оценки их технического состояния по бальной системе и комплекса АЭ контроля КАРАТ позволило повысить работоспособность и безопасность эксплуатации таких объектов повышенной опасности, как технологические трубопроводы угольных предприятий [10].

Выводы

Для более достоверной оценки технического состояния стальных технологических трубопроводов угольных предприятий по результатам их обследований разработаны:

- методика комплексной оценки технического состояния трубопроводов по бальной системе путем суммирования оценок по основным критериям;
- комплекс АЭ контроля трубопроводов КАРАТ для обнаружения утечек транспортируемого вещества, а также выявления в металле трубы развивающихся под нагрузкой дефектов типа трещин и значительных зон пластической деформации в местах утонения трубы. В результате ГП «Институт «УкрНИИпроект», был разработан отраслевой стандарт ГСТУ 10100174125.002–2003 «Правила обследования, оценка технического состояния технологических трубопроводов угольных предприятий». Выполнение рекомендаций этого нормативно-технического документа обеспечивает повышение работоспособности и безопасности эксплуатации технологических трубопроводов угольных предприятий.

Список литературы

1. Баклашов И. В., Антонов Г. П., Борисов В. Н. (1979) *Проектирование зданий и сооружений горных предприятий*. Москва, Недра.
2. Закон України «Про трубопровідний транспорт» від 15.05.1996 № 192/96-ВР.
3. Закон Украины «Об охране окружающей природной среды» от 02.12.2010 № 2756-VI.
4. Закон України «Про об'єкти підвищеної небезпеки» від 18.01.2001 № 2245-III.
5. Гірничий Закон України від 06.10.1999 № 1127-XIV.
6. Кодекс України «О недрах» от 22.12.2010 № 2849-VI.
7. Троицкий В. А. (2009) *Визуальный и измерительный контроль деталей машин, металлоконструкций, сварных соединений*. Киев, Феникс.
8. ГСТУ101.00174125.002-2003. *Правила обстежень, оцінка технічного стану технологічних трубопроводів вугільних підприємств*. Введено 21.12.2003.
9. Кулиш В. А., Крылов Э. С., Яций А. В. и др. (2005) *Аппаратура контроля трубопроводов акустико-эмиссионным методом. Материалы научно-практической конференции «Вплив руйнівних повеней та зсувних процесів на функціонування магістральних нафтопроводів, залізниць, автошляхів та електромереж. Екологічна безпека та перспективи розвитку трубопровідного транспорту, інших інженерних комунікацій»*. Ужгород, сс. 43–49.
10. Крылов Э. С., Кулиш В. А., Литвиненко Л. Е. (2016) Обеспечение работоспособности и безопасности эксплуатации объектов технологических комплексов угольных предприятий. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 1, 53–58.

References

1. Baklashov I. V., Antonov G. P., Borisov V. N. (1979) *Proektirovaniye zdaniy i sooruzheniy gornyykh predpriyatiy*. Moskva, Nedra. [in Russian].
2. Zakon Ukrainy « Pro truboprovodnyi transport» vid 15.05.1996 № 192/96-VR. [in Ukrainian].
3. Zakon Ukrainy «Ob ohrane okruzhayuschey prirodnoy sredy» ot 02.12.2010 № 2756-VI. [in Russian].
4. Zakon Ukrainy «Pro ob'ekty pidvyshchenoi nebezpeky» vid 18.01.2001 № 2245-III. [in Ukrainian].
5. Hirnychiy Zakon Ukrainy vid 06.10.1999 № 1127-XIV. [in Ukrainian].
6. Kodeks Ukrainy «O nedrah» ot 22.12.2010 № 2849-VI.
7. Troitsky V. A. (2009) *Vizualny i izmeritelny kontrol detal'nykh mashin, metallokonstruktsiy, svarnykh soedineniy*. Kiev, Feniks. [in Russian].
8. GSTU101.00174125.002-2003. *Pravila obstezhen, otsinka tekhnichnogo stanu tekhnologichnykh truboprovodiv vugilnykh pidpriemstv*. Vvedeno 21.12.2003. [in Ukrainian].
9. Hirnychiy Zakon Ukrainy vid 06.10.1999 № 1127-XIV. [in Ukrainian].
10. Krylov E. S., Kulish V. A., Litvinenko L. Ye. (2016) Ensuring serviceability and safe operation of coal processing facility equipment. *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchy kontrol*, 1, 53–58. [in Russian].

Е. С. КРИЛОВ, В. А. КУЛИШ

ДП «Інститут «УкрНДІпроект» Мінерговугілля України.
03142, м Київ, просп. Акад. Палладіна 46/2.
E-mail: ukrndipr@ukr.net

НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ І ОЦІНКА ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СТАЛЕВИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТРУБООПРОВОДІВ ВУГІЛЬНИХ ПІДПРИЄМСТВ

Для сталевих технологічних трубопроводів вугільних підприємств розроблена комплексна оцінка їх технічного стану

за бальною системою. В якості критеріїв оцінки використані фактори, що впливають на технічний стан трубопроводів. Розроблено та випробувано комплекс акустико-емісійного контролю КАРАТ для виявлення витоків, а також виявлення в металі труби дефектів типу тріщин, що розвиваються під навантаженням. За результатами досліджень розроблено галузевий стандарт ГСТУ 101.00174125.002–2003. Бібліогр. 10, табл. 2, рис. 2.

Ключові слова: технологічний трубопровід, вугільне підприємство, неруйнівний контроль, оцінка технічного стану, галузевий стандарт, акустична емісія

E. S. KRYLOV, V. A. KULISH

SE «Institute of «UrkNIIProekt» of Minenergouglya of Ukraine.
46/2 Acad. Palladin avenue, Kyiv, 03142 E-mail: urkndipr@urk.net

NON-DESTRUCTIVE TESTING AND EVALUATION
OF TECHNICAL STATE OF STEEL TECHNOLOGICAL
PIPELINES OF COAL ENTERPRISES

Complex evaluation of technical state by grade system was developed for steel technological pipelines of coal enterprises. The criteria for evaluation are the factors effecting technical state of the pipelines. The KARAT complex of acoustic-emission testing was developed for leakage detection as well as determination of defects of crack type propagating at loading in pipe metal. Branch standard GSTU 101.00174125.002–2003 was developed based on research results. Ref. 10. Tables 2, Figures 2.

Keywords: technological pipeline, coal enterprise, non-destructive testing, technical state evaluation, branch standard, acoustic emission

Поступила в редакцію
08.02.2017



Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»
Международная Ассоциация «Сварка»

Восьмая международная конференция ЛУЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СВАРКЕ И ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ

11 – 15 сентября 2017 г.
Украина, Одесса, отель «Курортный»

Председатели программного комитета
академик И.В. Кривцун
проф. В.С. Коваленко

Тематика конференции

- Лазерная и электронно-лучевая сварка, резка, наплавка, термообработка, нанесение покрытий
- Электронно-лучевая плавка и рафинирование
- Гибридные процессы
- 3D-технологии
- Моделирование лучевых технологий
- Материаловедческие проблемы лазерных и электронно-лучевых технологий

ОБОРУДОВАНИЕ ♦ ТЕХНОЛОГИИ ♦ МОДЕЛИРОВАНИЕ

АДРЕС ОРГКОМИТЕТА

Украина, 03680, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины
Тел./факс: (38044) 200-82-77, 200-81-45
E-mail: journal@paton.kiev.ua
<http://pwi-scientists.com/rus/twmp2017>

ЗВІТ ПРАВЛІННЯ УКРАЇНСЬКОГО ТОВАРИСТВА НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ та ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ (УТ НКТД) з 2013 по 2016 рр.

Організаційна робота

На засіданнях Правління та Бюро Правління розглядалися питання поточної діяльності Товариства і планування роботи з виконання статутних завдань, а саме:

- планування і виконання робіт із гармонізації європейських і міжнародних стандартів з неруйнівного контролю в Україні;
- необхідності реорганізації системи сертифікації персоналу з неруйнівного контролю на Укрзалізниці і в галузі атомної енергетики і їх приведення у відповідність до міжнародних стандартів;
- організації участі делегації УТ НКТД в роботі 11-ї Європейської конференції з неруйнівного контролю в Празі;
- організації участі спеціалістів УТ НКТД в 19-й Всесвітній конференції з Мюнхені і участі колективних членів УТ НКТД в інформаційному наповненні стенду Товариства;
- організації практичних семінарів з питань сертифікації і освоєння нової техніки;
- проведення 7-ї Міжнародної науково-технічної конференції і виставки «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання»;
- організації 8-ї Національної науково-технічної конференції «Неруйнівний контроль та технічна діагностика»;
- проведення П'ятого професійного конкурсу УТ НКТД в галузі неруйнівного контролю та технічної діагностики;
- організації віртуального музею неруйнівного контролю;
- підсумків участі УТ НКТД в європейському проєкті «Ship Inspector» із створення технологій неруйнівного контролю корпусів суден для виявлення критично небезпечних тріщин та корозії;
- участі УТ НКТД у міжнародних організаціях з НК (ICNDT, EFNDT, INDTA, ISO/TC 135);
- співпраці з Американським товариством з НК (ASNT), створення в Україні секції ASNT;
- сплати щорічних членських внесків в EFNDT та ICNDT;
- підготовки інформаційних матеріалів та статей для бюлетеня «НК-інформ», журналів «Техническая диагностика и неразрушающий контроль», «Территория NDT» та «В мире НК»;
- випуску «Інформаційного бюлетеня «НК-Інформ», сприяння випуску науково-технічного

журналу «Техническая диагностика и неразрушающий контроль», підтримки інтернет-сайту Товариства: www.usndt.com.ua;

- прийому у УТ НКТД нових членів;
- затвердження річних графіків конференцій і семінарів, що проводяться під егідою УТ НКТД.

Організація українських конференцій, семінарів та виставок з НК

За звітний період під егідою УТ НКТД були проведені такі заходи.

7-а Національна конференція «Неруйнівний контроль та технічна діагностика», яка була організована УТ НКТД і Інститутом електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України за сприяння Міжнародного комітету з НК (ICNDT) і Європейської федерації з НК (EFNDT).

Конференція проходила в найбільшому виставковому комплексі України – Міжнародному виставковому центрі паралельно з XI Міжнародним промисловим форумом.

Близько 200 українських і зарубіжних фахівців взяли участь у заходах, що відбулися в рамках конференції. На чотирьох тематичних секціях конференції: теорія і практика методів НК і ТД; розробка методів і нових технічних засобів НК і діагностики стану матеріалів і виробів тривалої експлуатації; НК і ТД в нафтогазовому комплексі; стандартизація, сертифікація та підготовка персоналу, було представлено понад 60 доповідей з теоретичних основ і практичного застосування методів неруйнівного контролю.

Паралельно з засіданнями секцій проходила виставка приладів і засобів для НК і ТД.

При сприянні і підтримці УТ НКТД в Києві весною 2014 і 2015 рр. відбулись організовані Асоціацією «ОКО» конференції «Неруйнівний контроль». Традиційно в рамках цієї конференції свої новітні розробки представляють науково-виробничі фірми «Ультракон-Сервіс» і «Промприлад».

Осінь **Міжнародна конференція і виставка «Сучасні методи неруйнівного контролю та технічної діагностики»**, організована Українським інформаційним центром «НАУКА. ТЕХНІКА. ТЕХНОЛОГІЯ» (Київ) і НВП «Машинобудування» (Дніпропетровськ) за сприяння УТ НКТД, відбулась на початку жовтня 2013 р. в Гурзуфі. На ній були представлені доповіді з останніми результатами досліджень і розробок по широкому спектру проблем НК, діагностування й прогнозування залишкового

ресурсу конструкцій; визначенню фізико-механічних характеристик матеріалів, підготовці й сертифікації фахівців з НК, розробці нових і вдосконалюванню існуючих нормативних документів в галузі НК і ТД та з інших актуальних питань.

В лютому 2013 р. в лабораторії неруйнівного контролю ПАТ «Укргідроенерго» (м. Вишгород) відбувся **практичний семінар по застосуванню сучасних ультразвукових дефектоскопів на фазованих решітках** для контролю зварних з'єднань та металу відповідального енергетичного обладнання.

В листопаді 2014 р. в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу відбулась **7-а Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазпромислового обладнання»**, на якій обговорювалися проблеми технічного, методичного, кадрового та нормативного забезпечення робіт в сфері технологічної безпеки обладнання та споруд у базових галузях промисловості України. Всього на конференції було представлено понад 80 доповідей, а кількість учасників перевищувала 120 осіб.

Участь в міжнародних конференціях і виставках з НК

Важливим етапом при розробці та реалізації наукомістких інженерних рішень і методологічних підходів є діалог із закордонними фахівцями, ознайомлення з їх досвідом у вирішенні конкурентних наукових і промислових задач.

Представники УТ НКТД брали участь у заходах, що проводили Європейська федерація з НК, Всесвітній комітет з НК, Міжнародна академія НК, так само як і в конференціях, які проводили національні товариства НК різних країн, як то Хорватія, Угорщина, Чехія та ін.

З 6 по 10 жовтня 2014 р. в Празі відбулась **11-а Європейська конференція з неруйнівного контролю**, організована Європейською федерацією з НК і Чеським товариством з НК. У цьому найбільшому міжнародному форумі з неруйнівного контролю, що проходив в Конгрес-центрі столиці Чеської республіки взяли у близько 2000 фахівців з 58 країн усіх континентів світу.

За традицією до такого масштабного заходу, яким є Європейська конференція, прагнуть приурочити свої зустрічі члени різних міжнародних організацій, діяльність яких пов'язана з неруйнівним контролем: Міжнародний комітет з НК (ICNDT), Європейська федерація з НК (EFNDT), Міжнародна академія НК (Academia NDT International – ANDTI), Міжнародна організація зі стандартизації (ISO) та ін. Тому програма конференції буда надзвичайно насиченою і включала: засідання наукових секцій та стендові сесії;

виставку засобів НК від провідних світових виробників; засідання Ради директорів і Генеральну асамблею EFNDT; Генеральну асамблею ICNDT; «День європейської науки», організований ANDTI спільно з ICNDT; засідання технічного комітету ISO/TC 135 «Неруйнівний контроль» і його підкомітетів по різним методам НК; семінари компанії-спонсорів конференції та інші заходи.

На конференцію було подано 670 доповідей, з яких науковий комітет відібрав 587 для подання на 37-ми секційних засіданнях (450 доповідей) і 10-ти стендових сесіях доповідей).

У виставці обладнання для неруйнівного контролю брали участь 135 компаній-експонентів з 17 країн. У число цих країн входила і Україна, виробників засобів НК якої представляли НПФ «Промприлад» (м. Київ) та НПФ «Спеціальні Наукові Розробки» (м. Харків).

Організація участі українських спеціалістів в Європейських і Всесвітніх конференціях є традиційною і дозволяє відслідковувати тенденції розвитку та рівень сучасних технологій та засобів НК, представити власні досягнення, познайомитися та поспілкуватися з колегами з інших країн.

У період з 9 по 18 червня 2014 р. в стародавньому болгарському місті Созополь на узбережжі Чорного моря пройшли **«Дні неруйнівного контролю»**. Ключовим заходом «Днів ...» була традиційна конференція «Дефектоскопія», яка зібрала разом близько 180 фахівців з різних країн, які представили 125 пленарних, секційних і стендових доповідей. Приємно відзначити велике представництво України на конференції: 13 фахівців з Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», НТУ «Харківський політехнічний інститут», Івано-Франківського НТУ нафти і газу.

Стандартизація в галузі НК

Питаннями гармонізації стандартів у сфері неруйнівного контролю та технічної діагностики в Україні опікується Технічний комітет № 78 «Технічна діагностика та неруйнівний контроль» (ТК-78). У сфері міжнародної стандартизації в неруйнівному контролі ТК-78 є дзеркальним комітетом ISO/TC 135 «Неруйнівний контроль».

З часу заснування і до підписання Угоди про Асоціацію, тобто з 1993 по 2013 рр., в Україні було впроваджено близько 80 стандартів, що знаходяться в компетенції ТК-78. В 2014 р. вже в рамках виконання Угоди в Україні впроваджено 22 стандарти в галузі НК, у 2015 – 57 стандартів і в 2016 р. – 60 стандартів.

Українське товариство неруйнівного контролю і технічної діагностики як громадське об'єднання представників наукових організацій, освітніх закла-

дів, виробників, випробувальних лабораторій, підприємств усіх галузей промисловості України за підтримки ТК-78 та ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України почало впроваджувати прийняті міжнародні стандарти як стандарти науково-технічного товариства України (СТТУ) методом тотожного перекладу. Такий процес має полегшити впровадження нових стандартів, оскільки забезпечить єдність використовуваної термінології, а участь у їх розробці та редагуванні членів технічного комітету стандартизації та висококваліфікованих фахівців неруйнівного контролю дозволить уникнути технічних помилок, притаманних нефаховим перекладам.

На сьогодні УТ НКТД прийнято наступні стандарти:

- СТТУ УТНКТД EN ISO 9712:2013 Неруйнівний контроль. Кваліфікація та сертифікація персоналу неруйнівного контролю (ДСТУ EN ISO 9712:2014, EN ISO 9712:2012);
- СТТУ УТНКТД EN ISO 3452-1:2016 Неруйнівний контроль. Капілярний контроль. Частина 1: Загальні вимоги (ДСТУ EN ISO 3452-1:2014, ISO 3452-1:2013);
- СТТУ УТ НКТД EN ISO 23279:2016 Неруйнівний контроль зварних з'єднань. Ультразвуковий контроль. Зняття характеристик індикацій у зварних з'єднаннях (ДСТУ EN ISO 23279:2014, EN ISO 23279:2010);
- СТТУ УТ НКТД EN ISO 23277:2016 Неруйнівний контроль зварних з'єднань. Капілярний контроль. Рівні приймання (ДСТУ EN ISO 23277:2014, EN ISO 23277:2009);
- СТТУ УТ НКТД ISO 17636-2:2016 Неруйнівний контроль зварних швів. Радіографічний контроль. Частина 2. Способи контролю рентгєнівським і гамма-випромінюванням із застосуванням цифрових детекторів (ДСТУ EN ISO 17636-2:2014, ISO 17636-2:2013).

Таким чином, завдяки зусиллям ТК-78 за активної участі зацікавлених сторін в Україні введено більшість міжнародних стандартів на методи НК. У подальшому технічний комітет зосередить свою увагу на моніторингу змін до чинних європейських і міжнародних стандартів, які введені в Україні, з тим, щоб підтримувати їх в актуальному стані.

Робота в галузі сертифікації персоналу

Центр сертифікації при УТ НКТД веде підготовку фахівців із широкого кола методичних питань НК.

Сертифікація проводиться відповідно до національного ДСТУ EN ISO 9712 «Неруйнівний контроль – Кваліфікація та сертифікація персоналу з неруйнівного контролю», міжнародного ISO 9712 (європейським EN ISO 9712) «Неруйнівний контроль – Кваліфікація та сертифікація персоналу, з неруйнівного контролю», американського SNT-TC-1A «Кваліфікація і сертифікація персоналу в галузі неруйнівного контролю» стандартами, а та-

кож НПАОП 0.00-1.63-13 «Правила сертифікації фахівців неруйнівного контролю».

ЦС при УТ НКТД акредитований Національним агентством з акредитації України (НААУ) як позавідомчий незалежний орган із сертифікації персоналу в галузі неруйнівного контролю на відповідність вимогам Міжнародного стандарту ISO/IEC 7024:2012 «Загальні вимоги до органів з сертифікації персоналу. Оцінка відповідності». Схема і процедури сертифікації персоналу в галузі неруйнівного контролю визначені відповідно до вимог EN ISO 9712:2012.

В системі сертифікації персоналу ЦС при УТ НКТД з підготовки та атестації персоналу працюють сім учбових центрів (УЦ) – УЦ «АЦНК при ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАНУ» (Київ), УЦНК Придніпровського АЦНК і ТД (Дніпропетровськ), УЦ АЦНК УкрГМК НПП «Днепрчерметавтоматика» (Дніпропетровськ), Центр підготовки при ТОВ «Морське бюро Реєстру» (Одеса), УЦ по НК СПКТБЗТ «Інфратранспроєкт-ДІТ» (Дніпропетровськ), УЦ ДП «Діамех-Україна» (Харків), УЦ «NORTH DEVICES» (Таллін, Естонія) і шість екзаменаційних центрів (ЕЦ) – ЕЦ «АЦНК при ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАНУ», ЕЦ «Придніпровський АЦНК і ТД» ЕЦ АЦНК УкрГМК НПП «Днепрчерметавтоматика», ЕЦ при ЗАТ «Морське бюро Реєстру технічної діагностики і неруйнівного контролю на залізничному транспорті (Дніпропетровськ), ЕЦ ДП «Діамех-Україна».

За минулі роки у визначених Українським товариством по НК і ТД навчальних і екзаменаційних центрах пройшли навчання і були атестовані близько 70 спеціалістів з-за кордону: Казахстану, Узбекистану, Молдови, Грузії, Вірменії, Таджикистану, Киргизії, а також Польщі та Словенії.

Навчальна база Центру сертифікації при УТ НКТД постійно розширюється і оновлюється. Удосконалюються програми навчання, методики викладання і проведення іспитів, поповнюється парк навчальних і екзаменаційних зразків, впроваджується процедура складання іспитів за допомогою комп'ютерних програм.

Співробітництво з закордонними товариствами та організаціями з НК

УТ НКТД є повним членом Європейської федерації неруйнівного контролю та Всесвітнього комітету з неруйнівного контролю, сплачує щорічні членські внески і приймає участь в діяльності робочих груп і комітетів цих організацій. Товариство приділяє значну увагу контактам з аналогічними закордонними структурами. З товариствами Російської Федерації, Республіки Беларусь, Молдови, Болгарії, Польщі, Італії, Чехії, Данії, Німеччини, Великої Британії, Хорватії, США укладені двосторонні угоди про співробітництво.

В 2012 р. уперше представник України (М. Л. Казакевич) був обраний до складу Ради директорів EFNDT.

Міжнародне визнання заслуг українських фахівців в галузі НК і ТД засвідчило запрошення їх до участі в створенні Міжнародної академії з НК (Academia NDT International). Членами Міжнародної академії з НК є В. О. Троїцький, М. Л. Казакевич, В. М. Учанін, а її почесним членом – академік Б. Є. Патон.

Товариство співпрацює з міжнародними організаціями із стандартизації ISO і CEN.

На адресу Секретаріату товариства надходять друковані видання Міжнародного комітету з НК («ICNDT Journal»), Британського інституту НК («INSIGHT»), Американського товариства з НК («Materials Evaluations»), а також товариств з НК Німеччини, Франції, Італії, Болгарії, Японії та деяких інших країн.

Організація професійних конкурсів

З нагоди проведення 8-ї Національної науково-технічної конференції «Неруйнівний контроль та технічна діагностика» був проведений П'ятий професійний конкурс серед спеціалістів і організацій, що працюють в галузі НК та ТД.

Основними завданнями проведення таких професійних конкурсів серед спеціалістів є наступні:

- визначення кращих вчених, спеціалістів, трудових колективів, лабораторій, фірм, підприємств та організацій, що працюють в галузі НК і ТД;
- популяризація досягнень в галузі НК і ТД кращих вчених, спеціалістів, трудових колективів лабораторій, фірм, підприємств та організацій України.

Для участі в конкурсі було подано 16 заявок за наступними напрямками та формами професійної діяльності:

- кращі промислові і сервісні лабораторії, що працюють в галузі НК і ТД;
- кращі науково-технічні публікації в журналах та видання книг;
- кращі молоді вчені та спеціалісти, що працюють в галузі НК і ТД;
- кращі студенти (аспіранти) за спеціальністю «НК та ТД».

Переможці і лауреати конкурсу нагороджені дипломами УТ НКТД відповідного ступеня на звітній конференції Товариства.

Підтримка наукових досліджень

Виконуючи європейські наукові проекти «LRUCM» і «ShipInspector», та підтримуючи дружні стосунки зі спорідненими товариствами з НК, УТ НКТД поширило в Україні інтерес до дуже перспективного методу низькочастотної акустичної технічної діагностики – далекодіючого ультразвукового

контролю спрямованими хвилями. Використовуючи цей метод, ІЕЗ та ряд інших організацій країни зараз успішно контролюють якість протяжних об'єктів.

УТ НКТД намагається всіляко розвинути технологію безплівкової Flash-радіографії в різних її варіантах. У всьому світі цифрова комп'ютерна радіографія тіснить плівкову радіографію. І в цьому напрямку наші фахівці зорієнтувалися на завтрашній день, на твердотільну мініатюрну радіографію. При цьому ми не випускаємо з уваги провідні компанії світу в цій галузі – Kodak, Fujy, Agfa і інші, що вирішують проблеми відмови від промислової плівкової радіографії, вигадуючи проміжні носії інформації у вигляді запам'ятовуючих пластин, великих панелей, наповнених світлодіодними панелями: нерухомими і тими, що переміщуються.

Видавнича і інформаційна діяльність

За підтримки УТ НКТД в ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України кожного кварталу видається науково-технічний журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» (головний редактор академік Б. Є. Патон).

УТ НКТД продовжує з періодичністю чотири рази на рік видавати інформаційний бюлетень «НК-Інформ». Цей бюлетень є вельми популярним серед українських спеціалістів з НК, оскільки містить цікаву поточну інформацію і витяги з публікацій, що з'явилися в профільних виданнях. Безперечною заслугою в регулярності видання «НК-інформ» є робота Л. В. Мартинової. Кожен член УТ НКТД може розмістити на сторінках бюлетеня інформацію про продукцію та послуги з НК і ТД, які надає він чи організація, яку він представляє.

УТ НКТД бере активну участь у підготовці матеріалів для спільного друкованого видання 11-ти національних товариств з НК журналу «Территория NDT».

В академічному українському виданні – науково-технічному журналі «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» введено розділ «В Українському товаристві НКТД».

Журнал і бюлетень розсилається безкоштовно колективним членам Товариства, а також в споріднені Товариства неруйнівного контролю країн Європи, у США, Канаду, Китай, Японію та ін. З метою популяризації діяльності УТ НКТД бюлетень розповсюджувався серед спеціалістів НК та суміжних напрямків діяльності на профільних конференціях, семінарах, виставках, курсах підготовки фахівців з неруйнівного контролю та технічних експертів, під час екзаменаційних сесій з НК.

В мережі Інтернет підтримується сайт Товариства: www.usndt.com.ua. Мета сайту – популяризація діяльності Товариства в Україні і за кордоном.

*Голова УТ НКТД професор В. О. Троїцький
Учений секретар УТ НКТД А. Л. Шекеро*

ВЫСТАВКА-КОНФЕРЕНЦИЯ «НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ-2017»

17–18 мая 2017 г. в г. Киеве «Ассоциацией «ОКО» при поддержке входящих в ассоциацию предприятий «Ультракон-Сервис», «Промприлад», Украинский научно-исследовательский институт неразрушающего контроля (УкрНИИНК) была проведена традиционная ежегодная выставка-конференция «Неразрушающий контроль-2017». Такие выставки-конференции проводятся с 1993 года и привлекают немало заинтересованных участников.

В работе выставки-конференции в этом году приняли участие свыше 120 представителей различных отраслей промышленности со всех регионов Украины, ученые и производственники, руководители и специалисты по неразрушающему контролю. Представители ПАО «Укрзализныця», ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, ПАО «Лемтранс», КП «Киевский метрополитен», ГП «НЕК «Укрэнерго», ГП «НАЕК «Энергоатом», ПАО «Укрнафта», ГП Укрметртестстандарт, ГП «Авиакон», ГП «Антонов», ПАО «Авиакомпания «Международные авиалинии Украины», «Средиземноморские авиалинии», ГП «410 завод», КБ «Южное», «Азовсталь», ПАО «Одесский припортовый завод», ГП «Одесский авиационный завод», ДП «ЛРЗ «Мотор» (Луцкий машзавод), Национальный авиационный университет, Государственный научно-исследовательский институт авиации и многих других смогли поучаствовать в выставке-конференции и получить много новой, интересной и полезной информации.

На специализированной выставке были представлены приборы и установки неразрушающего

контроля, разработанные и произведенные предприятиями «Ассоциации «ОКО»: современные многофункциональные ультразвуковые дефектоскопы, ультразвуковые толщиномеры, твердомеры, вихретоковые дефектоскопы, ультразвуковые и вихретоковые преобразователи, механизированный комплекс для неразрушающего контроля рельсовых путей, колесных пар и пр.

Работа конференции была нацелена на представление информации о достижениях в области разработок средств неразрушающего контроля, методических наработок, а также на определение перспективных путей сотрудничества при создании новой техники и технологий, установление деловых и коммерческих контактов.

Накануне выставки-конференции исполнилось 80 лет постоянному участнику конференций профессору Национального авиационного университета И. П. Белокуру. Организаторы и участники сердечно поздравили юбиляра и пожелали ему крепкого здоровья и дальнейшей многолетней и плодотворной деятельности.

На пленарном заседании с приветственным словом выступила председатель оргкомитета выставки-конференции, генеральный директор «Ассоциации «ОКО» Т. М. Луценко. Она отметила, что ежегодное проведение таких мероприятий стало доброй традицией, которая позволяет специалистам по неразрушающему контролю ознакомливаться с последними разработками производителей современного оборудования по НК, решению задач контроля в отраслях отечествен-



Открывает выставку-конференцию «Неразрушающий контроль-2017» генеральный директор «Ассоциации «ОКО» Т. М. Луценко.



Во время проведения секции «Железная дорога (вагонное, локомотивное и путевое хозяйство)»

ной промышленности, обмениваться мнениями и предложениями.

Ведущий технолог по УЗК канд. техн. наук Д. В. Галаненко на пленарном заседании сделал обзор инновационных средств ультразвукового и вихретокового контроля, производимых на предприятиях «Ассоциации «ОКО». Начальник производственного участка ООО «Ультракон-Сервис» А. Н. Черненко рассказал об образцах и преобразователях, разработанных для ультразвукового контроля и технической диагностики объектов.

В рамках конференции была организована работа пяти секций:

- железная дорога (вагонное, локомотивное и путевое хозяйство);
- атомная энергетика, тепловая энергетика, электрические сети;
- нефтегазовая отрасль и трубопроводный транспорт;
- авиастроение и техническое обслуживание летательных аппаратов;
- металлургия и машиностроение.

Участники конференции приняли активное участие в обсуждении докладов, смогли выступить с сообщениями по актуальным проблемам неразрушающего контроля, обмениваться мнениями и высказать свои пожелания и предложения.

На конференции был проведен также **семинар** (руководитель канд. техн. наук В. И. Радько) по обмену опытом между Органами по сертификации персонала в области неразрушающего контроля, Учебными и Аттестационными центрами, который вызвал большой интерес у участников.

На нем были освещены направления деятельности рабочей группы «Квалификация и сертификация персонала» в 2016–2017 гг., представлены документы Национального агентства по аккредитации Украины (НААУ) при аккредитации Органов оценки соответствия, рассмотрен вопрос подготовки, аттестации и сертификации персонала по неразрушающему контролю. Участники семинара обменялись опытом работы систем определения квалификации персонала в сфере добровольной сертификации, в авиации, на железнодорожном транспорте, в судостроении, в атомной энергетике.

С презентациями докладов, представленных на конференции, можно ознакомиться на официальном сайте «Ассоциации ОКО»: www.ndt.com.ua

Организаторы **выставки-конференции «Неразрушающий контроль-2017»** выражают благодарность всем специалистам, принявшим участие в этом мероприятии, и высказывают уверенность в том, что такие выставки-конференции должны проводиться регулярно, так как они дают возможность постоянно совершенствовать свои знания и опыт, повышать квалификацию специалистов, своевременно получать новую информацию о современных разработках оборудования и технологий, обмениваться мнениями и помогать друг другу в успешном решении возникающих проблем.

Продолжая установившуюся традицию, сообщаем, что очередная выставка-конференция **«Неразрушающий контроль-2018»** планируется в мае 2018 г.

Харченко В.

ОСОБЛИВОСТІ ОБСТЕЖЕННЯ АВАРІЙНИХ КОНСТРУКЦІЙ ВИСОТНИХ СПОРУД ТА НОВІТНІ ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ ПО ЇХ ВІДНОВЛЕННЮ ПРИ РЕКОНСТРУКЦІЇ*

Найбільш ушкодженими конструкціями каркасів висотних споруд є ферми і в'язі (рис. 1, а, б) [1–5].

Характерними пошкодженнями, що відбиваються на експлуатаційній придатності споруд, є:

- розриви несучих елементів або їх відрив в з'єднаннях (рис. 2, з);
- тріщини в основному металі або зварних швах в зонах підвищеної концентрації напружень;
- викривлення елементів більш за допустимі величини;
- руйнування захисних покриттів і корозія металу (рис. 2, а–в) та ін.

В умовах відсутності технічної документації є дуже важливим встановлення фактичної товщини елементів, їх перерізів, розкриття місць пошкодження корозією та ін. (рис. 2, д, е).

Після вивчення досвіду попередньої експлуатації споруд, а також невдалим, з нашої точки зору, ремонтних рішень дефектів монтажу (рис. 2, з) нами запропоновані новітні технічні рішення з ре-

монту та підсилення конструкцій за допомогою інноваційних полімерних композитних матеріалів (ПКМ) на основі вуглеграфітових ламелей та базальтового армування (рис. 3, 4) [5].

Таким чином основні причини обриву у зварному вузловому з'єднанні (вузол «А», рис. 2, з) фасонки та розкосів радіальної ферми з парних гнучких профілів швелерного типу наступні:

1 – скрізна щільова корозія (1) в стиснутому поясі ферми (5), яка пошкодила не тільки пояс, а також і сполучені планки (8) в місцях дотику з ними (рис. 2, а, б);

2 – дефект монтажу, який полягає в тому, що верхні елементи розкосів (4) були з'єднані дуговым зварюванням з верхнім елементом (5) пояса ферми, а потрібно було зварити їх через вузлову фасонку (3), внаслідок чого виник додатковий ексцентриситет, який і привів до обриву фасонки;

3 – невдало виконаний ремонт за допомогою вставки додаткового підсилюючого елемента зі

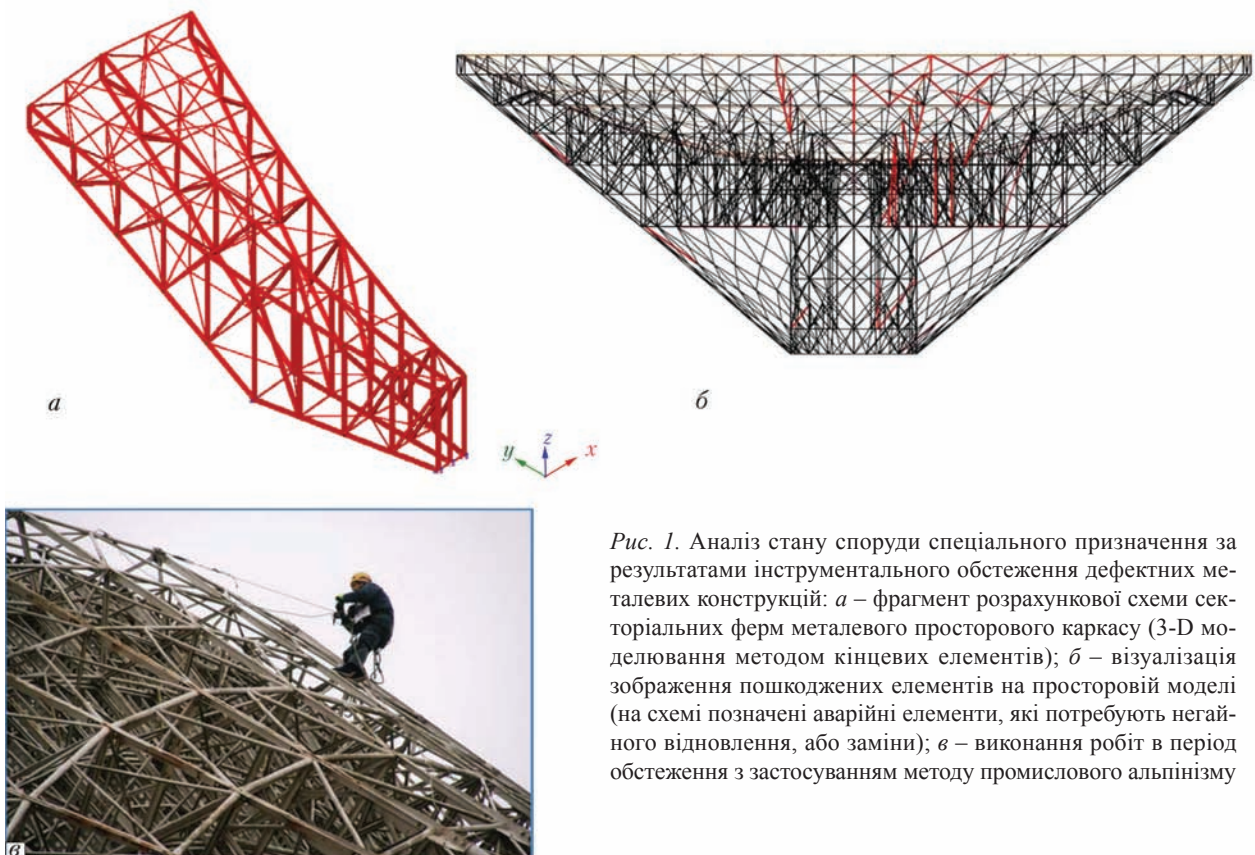


Рис. 1. Аналіз стану споруди спеціального призначення за результатами інструментального обстеження дефектних металевих конструкцій: а – фрагмент розрахункової схеми секторіальних ферм металевого просторового каркасу (3-D моделювання методом кінцевих елементів); б – візуалізація зображення пошкоджених елементів на просторовій моделі (на схемі позначені аварійні елементи, які потребують негайного відновлення, або заміни); в – виконання робіт в період обстеження з застосуванням методу промислового альпінізму

* Стаття на правах реклами



Рис. 2. Виявлення дефектних конструкцій на етапі інструментального обстеження: а, б – розкриття місць пошкодження щільовою корозією елементів ферм; в – наскрізне пошкодження трубчастих елементів в’язів; г – відрив фасонки (3) у вузловому з’єднанні між розкосами (4) та поясом радіальної ферми (5); 1 – прихована щільова корозія; 2 – наскрізне пошкодження трубчастого елемента; 3 – вузлова фасонка; 4 – розкіс ферми; 5 – пояс ферми складеного перерізу; 6 – додатковий підсилюючий елемент; 7 – зварний шов (додатковий концентратор напружень); 8 – з’єднувальні планки у складеному стрижні поясу ферми між гнучкими швелерами

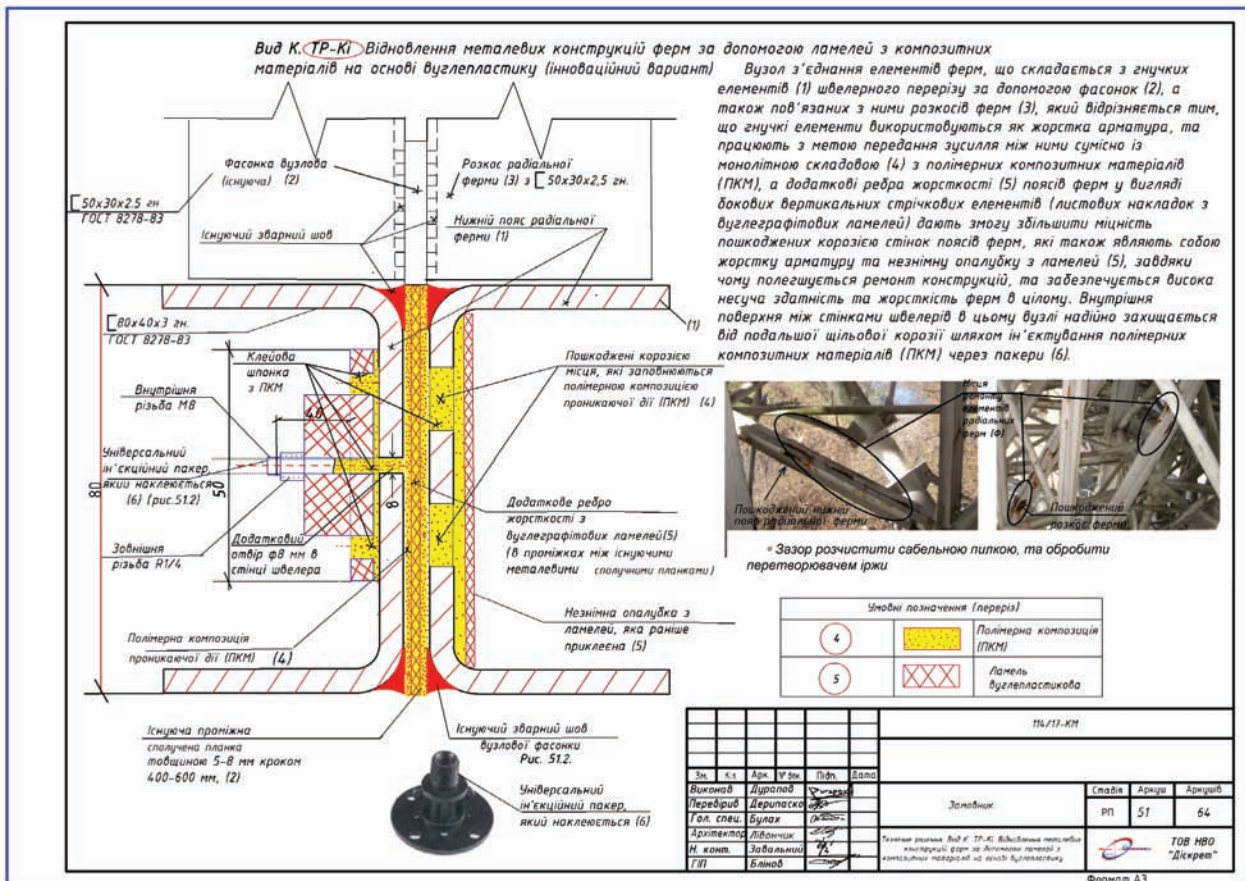


Рис. 3. Приклад технічного рішення з відновлення гнучких елементів металевих конструкцій ферм

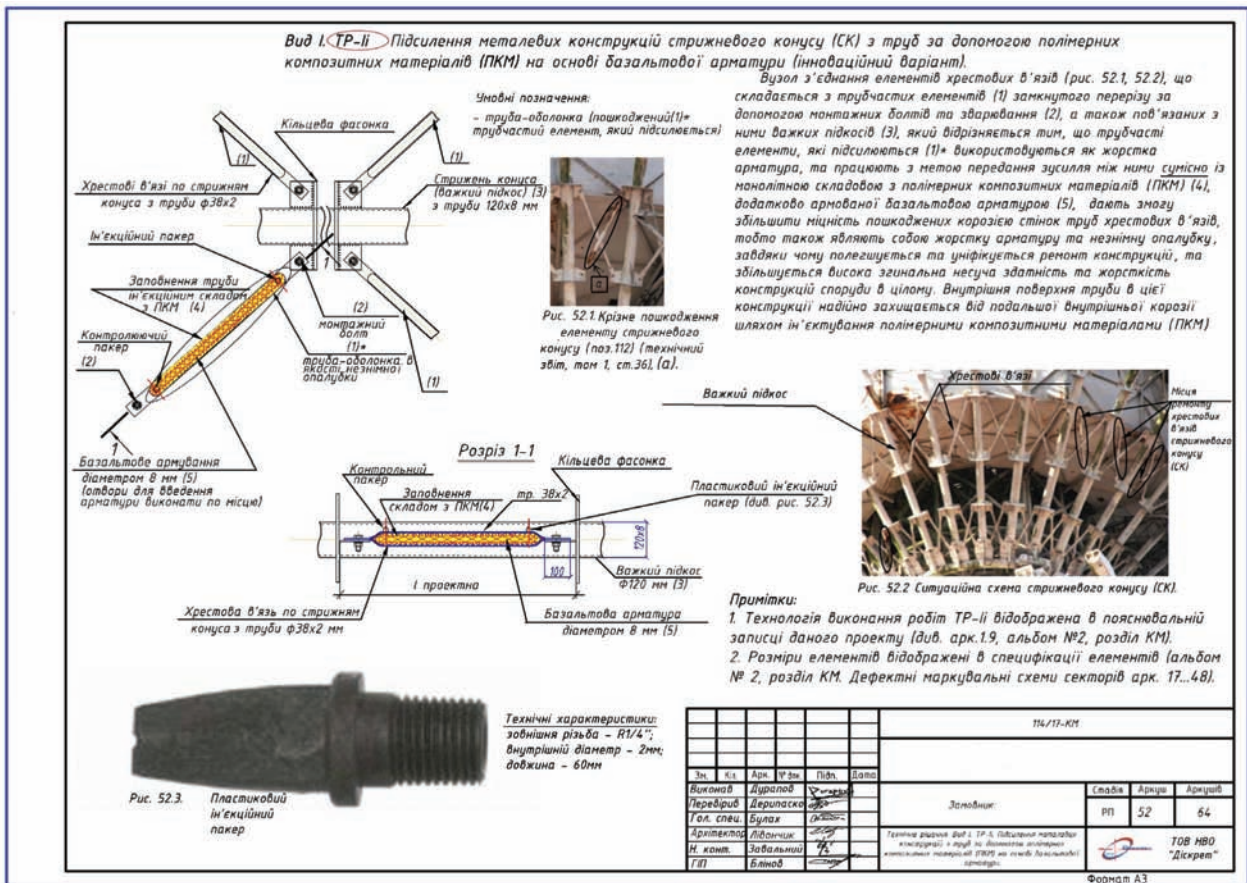


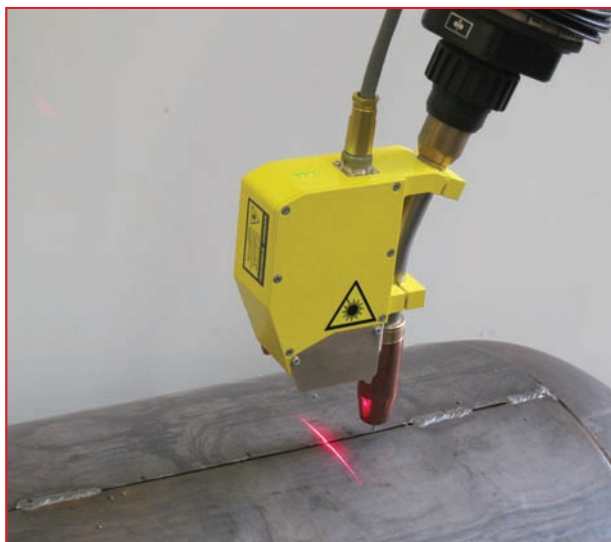
Рис. 4. Приклад технічного рішення з відновлення трубчастих елементів металоконструкцій

зварюванням (7) його з верхнім елементом пояса ферми (5) привів до додаткової концентрації напруження під час зварювання (при нагріванні (6) подовжився і вигнувся дугою).

1. Н. П. Мельников (ред.) (1980) *Металеві конструкції*. Москва, Стройиздат.
 2. Стороженко Л. І., Плахотний П. І., Чорний А. Я. (1991) *Розрахунок трубобетонних конструкцій*. Київ, Будівельник.

3. Блінов Ю. М. (2013) Особливості обстеження технічного стану металевих конструкцій висотних споруд за допомогою методів неруйнівного контролю та промислового альпінізму. *Рекомендації по відновлювальним роботам. Технічна діагностика і неруйнівний контроль*, 2, 57–61.
 4. Блінов Ю. М., Завальний Є. С., Лівончик Є. І. (2016) Особливості обстеження конструкцій висотних споруд при їх реконструкції. Там же, 3, 62.
 5. НВО «Діскрет». *Проект капітального ремонту споруди спеціального призначення № 114/17*.

Ю. М. Блінов, Є. С. Завальний, Є. І. Лівончик
 ТОВ НВО «Діскрет»
 E-mail: nvodiscret@gmail.com



АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

Лазерный сенсор для слежения за стыком при роботизированной дуговой сварке ROVICOR STS-200-R

Лазерный сенсор предназначен для автоматической компенсации погрешностей сборки заготовок под сварку путем бесконтактного отслеживания центра стыка в процессе роботизированной дуговой сварки.

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

ПОДПИСКА — 2018

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», «АС-Медиа», «ПресЦентр Киев», «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 2017 г. в открытом доступе архивы статей журнала за 2003–2015 гг.

РЕКЛАМА в журнале

«Техническая диагностика и неразрушающий контроль»

Реклама публикуется на обложках и внутренних вклейках следующих размеров

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

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

- Corell Draw, версия до 10.0
- Adobe Photoshop, версия до 7.0
- QuarkXPress, версия до 7.0
- Изображения в формате TIFF, цветовая модель CMYK, разрешение 300 dpi

Стоимость рекламы и оплата

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

- Оплата в гривнях или рублях РФ по официальному курсу

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

- Для постоянных партнеров предусмотрена система скидок

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

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

- Ответственность за содержание рекламных материалов несет рекламодатель

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

Подписано к печати 15.06.2017. Формат 60x84/8. Офсетная печать.
 Усл. печ. л. 9,04. Усл.-отт. 9,89. Уч.-изд. л. 10,24
 Печать ООО «ДИА».
 03022, г. Киев-22, ул. Васильковская, 45.