

**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**, **Н. А. Притула** (отв. секретарь)  
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  
к.х.н. **М. Л. Казакевич**  
Ин-т физической химии, Киев  
д.т.н. **О. М. Карпаш**  
Ив.-Франк. нац. техн. ун-т нефти и газа  
д.ф.-м.н. **З. Т. Назарчук**, д.т.н. **В. Н. Учанин**  
Физ.-мех. ин-т, Львов  
д.т.н. **Г. И. Прокопенко**  
Ин-т металлофизики, Киев  
д.т.н. **В. А. Стороженко**  
Харьков. нац. ун-т радиоэлектроники  
д.т.н. **С. К. Фомичов**  
НТУУ «Киев. политех. 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. Клюев**  
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, 03150, Украина  
Тел./факс: (044) 200-82-77, 205-23-90  
E-mail: journal@paton.kiev.ua  
www.patonpublishinghouse.com

**Редакторы**

К. Г. Григоренко, Т. В. Юштина

**Электронная верстка**

Л. Н. Герасименко, Д. И. Серета

**Свидетельство**

о государственной регистрации  
KB4787 от 09.01.2001.  
ISSN 0235-3474  
Doi.org/10.15407/tdnk

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

**СОДЕРЖАНИЕ**

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ**

- СКАЛЬСКИЙ В. Р., МОКРЫЙ О. М.** Оценка поврежденности ферритно-перлитной стали по величине изменения скорости продольной акустической волны..... 3
- СТАСЮК С. З.** Контроль технического состояния технологических трубопроводов при длительной эксплуатации в водородо-содержащей рабочей среде ..... 8
- УЧАНИН В. Н., МИНАКОВ С. М.** Влияние механических напряжений на сигнал вихретокового преобразователя магнитной анизотропии..... 21
- МИЛЕНИН А. С., ВЕЛИКОИВАНЕНКО Е. А., РОЗЫНКА Г. Ф., ПИВТОРАК Н. И., ХИМИЧ А. Н., СИДОРУК В. А.** Высокопроизводительные методы численных исследований для решения задач экспертизы работоспособности дефектных конструкций..... 27

**ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ**

- НЕДОСЕКА А. Я., НЕДОСЕКА С. А., ЯРЕМЕНКО М. А., ОВСИЕНКО М. А.** Применение технологии акустико-эмиссионного контроля при оценке состояния сосудов химического производства ..... 34
- ПЛЕСНЕЦОВ С. Ю., СУЧКОВ Г. М.** Способ электромагнитно-акустического контроля металлоизделий без «мертвой» зоны ..... 42
- КУЛИШ В. А., КРЫЛОВ Е. С.** Контроль и оценка технического состояния металлических конструкций зданий и сооружений шахтной поверхности..... 47
- ДЖАЛА Р. М., ВЕРБЕНЕЦ Б. Я., МЕЛЬНИК М. И., СЕМЕНЮК О. Н., ЧЕРВИНКА О. А.** Методология и аппаратура для оперативных комплексных обследований подземных трубопроводов..... 53

**ХРОНИКА**

Конференция по неразрушающему контролю в новом формате ..... 59

**ИНФОРМАЦИЯ**

- Предприятию «УЛЬТРАКОН-СЕРВИС» 25 лет ..... 61
- Конференция-выставка «НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ-2018» ..... 63
- Новая книга ..... 64

**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

СКАЛЬСКИЙ В. Р., МОКРИЙ О. М. Оцінка пошкодженості феритно-перлітної сталі за величиною зміни швидкості поздовжньої акустичної хвилі .....	3
СТАСЮК С. З. Контроль технічного стану технологічних трубопроводів за довготривалої експлуатації у водневовмісному робочому середовищі .....	8
УЧАНІН В. М., МИНАКОВ С. М. Вплив механічних напружень на сигнал вихрострумового перетворювача магнітної анізотропії .....	21
МИЛЕНІН О. С., ВЕЛИКОІВАНЕНКО О. А., РОЗИНКА Г. П., ПІВТОРАК Н. І., ХІМІЧ О. М., СИДОРУК В. А. Високопродуктивні методи чисельного дослідження для розв'язання задач експертизи роботоздатності дефектних конструкцій .....	27

### ВИРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ

НЕДОСЕКА А. Я., НЕДОСЕКА С. А., ЯРЕМЕНКО М. А., ОВСІЄНКО М. А. Застосування технології акустико-емісійного контролю при оцінці стану посудин хімічного виробництва .....	34
ПЛЕСНЕЦОВ С. Ю., СУЧКОВ Г. М. Спосіб електромагнітно-акустичного контролю металовиробів без «мертвої» зони .....	42
КУЛІШ В. А., КРИЛОВ Е. С. Контроль і оцінка технічного стану металевих конструкцій будівель і споруд шахтної поверхні .....	47
ДЖАЛА Р. М., ВЕРБЕНЕЦЬ Б. Я., МЕЛЬНИК М. І., СЕМЕНЮК О. М., ЧЕРВІНКА О. О. Методологія та апаратура для оперативних комплексних обстежень підземних трубопроводів .....	53

### ХРОНІКА

Конференція з неруйнівного контролю в новому форматі .....	59
--	----

### ІНФОРМАЦІЯ

Підприємству «УЛЬТРАКОН-СЕРВІС» 25 років .....	61
Конференція-виставка «НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ-2018» .....	63
Нова книга .....	64

## CONTENTS

### SCIENTIFIC-TECHNICAL

SKALSKIY V. R., MOKRII O. M. Evaluation of damage level in ferritic-pearlitic steels by the value of the change of longitudinal acoustic wave velocity .....	3
STASYUK S. Z. Monitoring the technical condition of process piping at long-term operation in hydrogen-containing working medium .....	8
UCHANIN V. M., MINAKOV S. M. Influence of mechanical stresses on the signal of eddy current transducer of magnetic anisotropy .....	21
MILENIN A. S., VELIKOIVANENKO E. A., ROZYNSKA G. F., PIVTORAK N. I., KHINICH A. N., SIDORUK V. A. High-performance methods of numerical studies for solving the problems of evaluation of defective structure serviceability .....	27

### INDUSTRIAL

NEDOSEKA A. YA., NEDOSEKA S. A., YAREMENKO M. A., OVSIENKO M. A. Application of the technology of acoustic emission monitoring at evaluation of the condition of vessels in chemical production .....	34
PLESNETSOV S. Yu., SUCHKOV G. M. Method of electromagnetic-acoustic monitoring of metal products without the «dead zone» .....	42
KULISH V. A., KRYLOV E. S. Monitoring and assessment of the technical condition of metals structures of buildings and constructions of mine surface .....	47
JALA R. M., VERBENETS B. Ya., MELNIK M. I., SEMENYUK O. M., CHERVINKA O. O. Metrology and instrumentation for operative complex examination of underground pipelines .....	53

### BRIEF INFORMATION

Conference on nondestructive testing in a new format .....	59
--	----

### INFORMATION

«ULTRACON-SERVICE» Company is 25 .....	61
Conference-exhibition «NON-DESTRUCTIVE TESTING-2018» .....	63
New book .....	64

#### Адреса редакції

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України  
вул. Казимира Малевича, 11, м. Київ, 03150, Україна,  
Тел./факс: (38044) 200-82-77, 205-23-90  
E-mail: journal@paton.kiev.ua  
www.patonpublishinghouse.com

#### Address

The E. O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine,  
11 Kazimir Malevich str., Kyiv, 03150, Ukraine  
Tel./Fax: (38044) 200-82-77, 200-23-90  
E-mail: journal@paton.kiev.ua  
www.patonpublishinghouse.com

# ОЦІНКА ПОШКОДЖЕНОСТІ ФЕРИТНО-ПЕРЛІТНОЇ СТАЛІ ЗА ВЕЛИЧИНОЮ ЗМІНИ ШВИДКОСТІ ПОЗДОВЖНЬОЇ АКУСТИЧНОЇ ХВИЛІ

В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ, О. М. МОКРИЙ

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5.  
E-mail: skalsky.v@gmail.com, mokomo@lviv.farlep.net

Отримано кількісну характеристику зміни швидкості поздовжньої акустичної хвилі та густини в феритно-перлітній сталі в результаті пластичної деформації. Показано можливість оцінювати величину пошкодженості, яка виникла внаслідок пластичної деформації, за зміною швидкості акустичної хвилі. На основі експериментальних даних встановлено кореляційну залежність між зміною швидкості та пошкодженості у вигляді полінома третього степеня. Бібліогр. 14, рис. 3.

*Ключові слова:* пластична деформація, пошкодженість, швидкість акустичної хвилі, густина

Розробка ефективних і неруйнівних методик оцінки стану металів в елементах конструкцій є актуальним завданням сучасності. Одним з важливих параметрів, який визначає ресурс металу, є його пошкодженість. Вона проявляється через зміну різних характеристик: пружних модулів, густини, твердості, механічних властивостей тощо [1, 2]. Одним із способів оцінювання пошкодженості є вимірювання швидкості ультразвукових хвиль в матеріалі [2, 3]. Фізична суть такого підходу неруйнівного контролю ґрунтується на залежності швидкості поширення акустичних хвиль від пружних модулів та густини, які є чутливими до пошкодженості. З іншого боку, ефективність використання зміни швидкості базується на існуванні високоточних методик її вимірювання.

Створення нових сучасних методів збудження та реєстрації ультразвукових хвиль, а також опрацювання отриманих електричних сигналів відкривають нові перспективи для застосування цього підходу. Одним з основних обмежуючих факторів використання вимірювання швидкості акустичних хвиль для діагностики стану металу є складність фізичної інтерпретації результатів вимірювань. Це зумовлено тим, що зміна стану металу неоднозначно впливає на величину швидкості, тобто по-різному зумовлює її зміну. Це створює різне інтерпретування експериментальних результатів.

Для вирішення цієї проблеми використовують два різних методичних підходи. Перший полягає в проведенні додаткових досліджень, які дають можливість оцінювати вклади різних факторів у зміну швидкості поширення хвиль у металі. За певних умов це може бути використання вимірювання швидкості різних типів пружних хвиль [3], проведення додаткових металографічних досліджень [4] або проведення вимірювань в умовах,

коли можна ігнорувати роль деяких несуттєвих чинників зміни швидкості [5]. Разом з тим, враховуючи складність процесів, що з часом відбуваються в металах, і їх просторову неоднорідність, такий підхід є достатньо трудомістким і не завжди можливим.

Інший підхід полягає у побудові калібрувальних залежностей для конкретних процесів, які проходять в металах за певних умов. В його основу покладено припущення, що співвідношення між різними фізичними чинниками, які вносять вклад у вимірювану величину, є однакові для конкретних умов протікання процесу зміни стану металу. В даному разі достатньо експериментально побудувати калібрувальні графіки залежності вимірюваної величини від параметра, який характеризує стан металу за певних умов. Прикладом такого підходу є використання сигналу акустичної емісії для діагностування об'ємної пошкодженості [1]. Також така методика є суттєво простішою і більш надійною за попередню, оскільки базується на експериментальних калібрувальних залежностях. В роботі розглянуто можливість використання даного підходу для визначення пошкодженості в пластично деформованій ферито-перлітній сталі за величиною зміни швидкості акустичних хвиль, які проходять через її об'єм.

**Чинники, що впливають на зміну швидкості ультразвукових хвиль за пластичної деформації металів.** Пластична деформація є складним явищем, за якого відбувається зміна властивостей деформованого металу. Вона призводить до зміни у ньому швидкостей різних типів ультразвукових хвиль. Причиною цього, як вже відзначалось вище, можуть бути різні явища, що відбуваються під час пластичного деформування. До основних чинників, які впливають на зміну швидкості за пластичного деформування металу, можна відне-

сти виникнення розривів суцільності (виникнення мікропор та мікротріщин), появу чи зміну текстури металу, виникнення залишкових механічних напружень [6–9].

Розглянемо послідовно вплив кожного з цих чинників. Мікропори виникають вже за невеликих ступенів пластичної деформації [10] в місцях, де локальні механічні напруження перевищують мікротісність. Відповідно виникає пошкодженість, яку можна визначити як [3]:

$$\theta = \frac{\rho_0 - \rho}{\rho_0}, \quad (1)$$

де  $\rho$  – густина тіла з порами;  $\rho_0$  – густина тіла без пор.

Величина швидкості ультразвукової хвилі залежить від модуля пружності та густини так [6, 11]:

$$V = \sqrt{\frac{C}{\rho}}, \quad (2)$$

де  $C$  – модуль пружності.

Поява мікропор впливає на зміну швидкості акустичної хвилі двома шляхами. З одного боку мікропори призводять до зменшення густини, а з іншого – до зменшення модуля пружності металів. Як випливає з формули (2), зменшення густини та пружного модуля в певній мірі компенсують одне одного, проте в підсумку швидкість все таки зменшується.

Іншим механізмом, що спричинює зміну акустичних властивостей металів і сплавів, є виникнення текстури. Вона полягає у переважній кристалографічній орієнтації зерен металу [12]. Проявляється текстура у анізотропії фізичних властивостей. Значення фізичних характеристик полікристалу є проміжним між максимальною та мінімальною їх величиною у відповідному монокристалі. За пластичної деформації виникає текстура під час повороту кристалографічних площин в результаті ковзання та двійникування [12]. Спочатку це відбувається в найбільш сприятливо орієнтованих площинах, а із збільшенням механічного напруження охоплює все більше їх число.

Ще одним чинником, згідно з яким змінюється швидкість акустичної хвилі, є виникнення залишкових механічних напружень. В основі цього чинника лежить акустопружний ефект, який полягає у зміні пружних модулів металу під дією механічних напружень. Величина зміни швидкості залежить тоді від відповідних акустопружних коефіцієнтів. Згідно з літературними даними [13] величина зміни швидкості становить долі відсотка за напружень у сотні МПа.

Таким чином, пластична деформація зумовлює складні процеси, які призводять до зміни швидкості проходження пружної хвилі у тілі. Важливим є визначення співвідношення між вкладами

різних фізичних чинників, які впливають на цей процес. Можна припустити, що для заданих умов деформування співвідношення між ними для конкретних металів будуть мати певні сталі закономірності. Тому важливою є побудова емпіричних залежностей, на основі яких можна визначити пошкодженість за величиною зміни швидкості проходження акустичної хвилі у пластично деформованому металі.

**Модель зв'язку пошкодженості зі зміною швидкості акустичної хвилі.** Пошкодженість впливає на зміну модуля пружності, яку можна записати так [10]:

$$C = C_0 - \Delta C_p = C_0(1 - \alpha\theta), \quad (3)$$

де  $C_0$  – модуль пружності матеріалу, в якому нема пор;  $\Delta C_p$  – зміна модуля пружності, спричинена пошкодженістю. Зміну модуля пружності, яку спричинено іншими механізмами, позначимо  $\Delta C_r$ . Тоді:

$$\Delta C = \Delta C_p + \Delta C_r, \quad (4)$$

де  $\Delta C$  – сумарна зміна пружного модуля у разі пластичного деформування.

У загальному випадку зв'язок між різними механізмами зміни пружного модуля може залежати від багатьох чинників і мати складний вигляд. Проте для конкретного режиму і умов пластичної деформації з певним наближенням цю залежність можна записати у вигляді ряду:

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \beta_1 \frac{\Delta C_p}{C_0} + \beta_2 \left(\frac{\Delta C_p}{C_0}\right)^2 + \beta_3 \left(\frac{\Delta C_p}{C_0}\right)^3, \quad (5)$$

де  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  – коефіцієнти розкладу.

З іншого боку вираз, який зв'язує зміну швидкості і зміну пружного модуля та густини, має вигляд:

$$V_0^2 - V^2 = \frac{C_0}{\rho_0} - \frac{C_0 - \Delta C}{\rho_0 - \Delta \rho}, \quad (6)$$

де  $\Delta \rho$  – зміна густини за пластичної деформації. Вираз (6) із урахуванням (3)–(5) можна привести до вигляду:

$$2 \frac{\Delta V}{V_0} - \frac{\Delta V^2}{V_0^2} = \frac{(1 + \alpha - \alpha\beta_1)\theta - \alpha^2\beta_2\theta^2 + \alpha\beta_3\theta^3}{1 - \theta}, \quad (7)$$

де  $\Delta V$  – зміна швидкості акустичної хвилі у разі пластичного деформування. Таким чином, вираз (7) дозволяє знайти зв'язок між зміною швидкості і пошкодженістю за пластичної деформації. Очевидно, що коефіцієнти  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  будуть залежати від умов, за яких відбувалось деформування.

**Матеріали та методи досліджень.** Досліджували пластично деформовані зразки з феритно-перлітної сталі. Для досліджень використовували призматичні зразки зі сталі 20 довжиною 280 мм і поперечним перерізом робочої частини 15×7 мм<sup>2</sup> (рис. 1). Визначали розподіл швидкості поши-

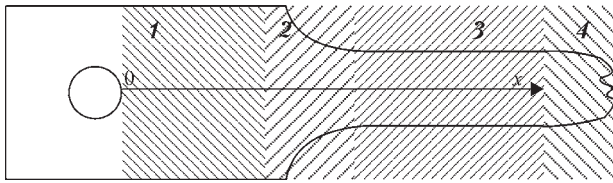


Рис. 1. Половина зразка після розриву

рення поздовжньої акустичної хвилі та густини вздовж осі зразка використовуючи для цього їх половини, що утворилися в результаті його розриву на машині УМЭ-10 ТМ. До розриву зразки термічно обробляли для зменшення залишкових механічних напружень. Термічна обробка полягала в нагріванні зразків до 500 °С і витримуванні при цій температурі протягом трьох годин з подальшим повільним охолодженням разом із пічкою.

Навантажували зразки розтягом із швидкістю 0,5 мм/хв до руйнування. Після руйнування кожну половинку зразка розрізали на частини довжиною 10 мм для вимірювання зміни густини. На цих самих частинах зразка проводили вимірювання швидкості пружних хвиль у напрямку, перпендикулярному до напрямку розтягу.

**Вимірювання швидкості проходження ультразвукових хвиль.** Швидкість ультразвукових хвиль вимірювали луно-імпульсним методом [14]. Вимірювали час проходження акустичного імпульсу по зразку за його багатократного відбивання від протилежних граней, а також розміри зразка в напрямку проходження акустичних імпульсів і на основі цих даних визначали швидкість ультразвукової хвилі. Для збудження та реєстрації ультразвукових імпульсів використовували п'єзоелектричний перетворювач з резонансною частотою 10 МГц. Тривалість акустичного імпульсу становила кілька мікросекунд. Визначали відносну зміну швидкості пружної хвилі  $\Delta V/V$  в пластично деформованій ділянці матеріалу відносно швидкості в недеформованій частині. Похибка вимірювання швидкості становила 0,06 %.

**Вимірювання густини.** Для оцінки величини пошкодженості згідно (1) проводили вимірюван-

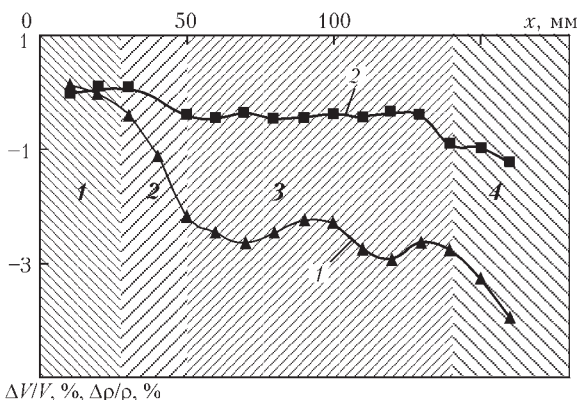


Рис. 2. Типові просторові залежності зміни швидкості проходження поздовжньої акустичної хвилі та густини для розірваних зразків: 1 – зміна швидкості; 2 – зміна густини

ня густини гідростатичним методом з допомогою лабораторних ваг RADWAG PS750. Маса досліджуваних кусочків матеріалу знаходилась в межах 10...11 г. Похибка вимірювання густини становила 0,05 %.

**Інтерпретування отриманих результатів.** Зображення половини вихідного зразка після розриву показано на рис. 1, а на рис. 2 приведені типові залежності розподілу зміни швидкості і густини за довжиною зразка. Координата  $x$  напрямлена вздовж прикладення зусилля розтягу і її початок знаходиться в точці 0 (рис. 1). Для аналізу змін властивостей зразків, які отримали внаслідок пластичної деформації, кожну половину досліджуваного зразка можна умовно розбити на чотири ділянки, які мають спільні особливості. Розташування цих ділянок на рис. 1, 2 показано відповідним штрихуванням і цифрами. Першою є ділянка, в якій відсутня пластична деформація. Відповідно там нема зміни швидкості ультразвукової хвилі і густини, викликаної пластичною деформацією. Швидкість на цій частині і густину зразка використовували для порівняння її значення на інших ділянках. Друга ділянка знаходиться на початку робочої області зразка. В ній є перехід від широкої до вузької частини зразка, тобто до початку робочої ділянки, яка незначно пластично деформована і знаходиться в межах 30...50 мм. Різке зменшення перерізу зразка призводить до великих градієнтів механічних напружень під час його розтягу. В цій ділянці швидкість зменшується приблизно на 2 %, а густина – на 0,4...0,6 %. Третьою ділянкою є основна площа робочої частини зразка і її розмір лежить від 50 мм до області, яка межує з місцем розриву. В цій ділянці швидкість зменшується на 0,7...1,0 %, а величина густини практично є незмінною в межах ділянки. Четвертою є зона біля самого місця розриву зразка, розмір якої умовно становить 15...20 мм. В цій ділянці спостерігається найбільше відносне локальне видовження зразка, а також екстремальні зміни властивостей металу. Зміна густини тут більше за 1 %, а зміна швидкості проходження пружних хвиль більше 4 %.

**Оптимізація поліному апроксимації.** Розглянемо можливий аналітичний зв'язок між пошкодженістю і зміною швидкості у пластично деформованому об'ємі. В основі виразу (7), який пов'язує зміну швидкості і пошкодженість деформованого металу, лежить вираз (5) у вигляді поліному з трьома членами. Для оцінки оптимальності кількості членів ряду необхідно розглянути питання адекватності представлення експериментальних даних запропонованою аналітичною залежністю.

Вираз (7) можна привести до вигляду:

$$\gamma = a\theta + b\theta^2 + c\theta^3, \tag{8}$$

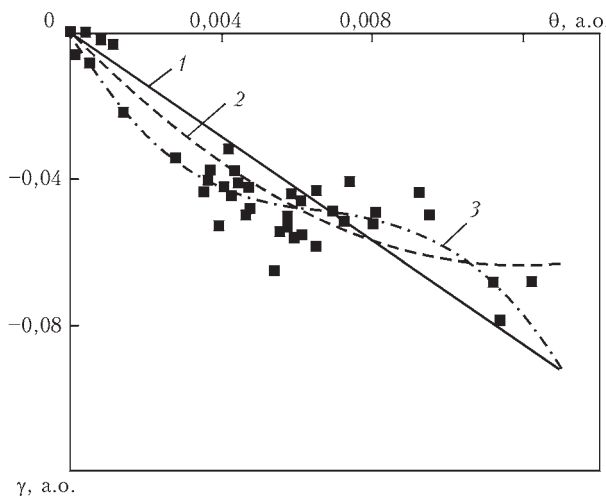


Рис. 3. Залежність величини  $\gamma$  від пошкоджуваності  $\theta$  і апроксимаційні криві різного порядку: ■ – експериментальні дані; 1 – лінійна апроксимація; 2 – квадратична апроксимація; 3 – кубічна апроксимація

$$\text{де } \gamma = \left(2 \frac{\Delta V}{V_0} - \frac{\Delta V^2}{V_0^2}\right)(1-\theta), \quad a = 1 - \alpha + \alpha\beta_1, \quad b =$$

$= \alpha^2\beta_2, \quad c = \alpha^3\beta_3$ . Залежно від того, скільки членів ряду використано у виразі (5), ліва сторона виразу (8), відповідно, буде мати різну кількість членів зі степенями за  $\theta$ . На основі експериментальних результатів можна оцінити оптимальність виразу (8). На рис. 3 побудовано графік, в якому по осі ординат відкладено ліву частину виразу (8)  $\gamma$ , а по осі абсцис – величину пошкоджуваності  $\theta$ . Як видно з рис. 3, спостерігається певний розкид даних, який можна пояснити похибками вимірювання, а також неоднорідностями пластичної деформації в різних ділянках. Поліном за степенями пошкоженості в правій частині виразу (8) апроксимує отримані експериментальні залежності. Точність апроксимації зростає із ростом степеня поліному. Нами зроблено порівняння поліномів від першого до четвертого порядків. Для них було знайдено коефіцієнти розкладу методом найменших квадратів.

Для кількісного порівняння наближення з допомогою різних апроксимаційних поліномів розраховано величини відповідних індексів кореляції. Індекс кореляції для лінійного поліному становив 0,8, для квадратичного 0,91, а для третього і четвертого степеня 0,943 і 0,945, відповідно. Таким чином, поліноми третього і четвертого степенів практично однаково апроксимують експериментальні дані. Тому можна обмежитись кубічним членом у виразі (8) і, відповідно, кубічним членом у формулі (5). Відповідні апроксимаційні криві показано на рис. 3. Крива, задана поліномом четвертого степеня, практично співпадає з кривою третього степеня і на рис. 3 не представлена.

Отже, на основі аналізу точності апроксимації експериментальних даних з допомогою індексу кореляції можна стверджувати, що вираз (5) задо-

вільно описує зв'язок між змінами пружного модуля, викликаного різними чинниками за пластичної деформації.

Отримана залежність зміни швидкості від пошкоженості може бути покладена в основу методики її оцінки. Для реалізації методики необхідно визначити коефіцієнти у виразі (8) для конкретних умов пластичного деформування, що можливо зробити з допомогою відповідних вимірювань і таким чином отримати калібрувальну залежність між пошкоженістю і зміною швидкості акустичної хвилі. За допомогою отриманої калібрувальної кривої можна визначати пошкоженість за вимірюваною величиною зміни швидкості акустичної хвилі.

### Висновки

Проведено дослідження просторового розподілу швидкості повздовжньої акустичної хвилі та густини в пластично деформованих зразках з феритно-перлітної сталі. Їх взаємозв'язок інтегрально можна подати у вигляді кубічного полінома за степенями пошкоджуваності. На основі експериментальних даних показано, що таке представлення є оптимальним з точки зору точності апроксимації та кількості членів поліному апроксимації. Це може слугувати методикою визначення пошкоженості металу за вимірювано експериментально величиною зміни швидкості ультразвукової хвилі в металі, підданому пластичній деформації.

### Список літератури

1. Назарчук З. Т., Скальський В. Р. (2009) Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій: Наук.-техн. пос. у 3 т. Т. 2. *Методологія акустико-емісійного діагностування*. Київ, Наукова думка.
2. Ерофеев В. И., Никитина Е. А. (2010) Согласованная динамическая задача оценки поврежденности материала акустическим методом. *Физические основы технической диагностики*, 56, 4, 554–557.
3. Мишакин В. В., Кассина Н. В., Гончар А. В. и др. (2008) Акустический метод оценки поврежденности материалов и конструкций, подвергаемых силовому нагружению. *Вестник научно-технического развития*, 5, 61–66.
4. Гончар А. В., Мишакин В. В. (2012) Оценка величины пластической деформации в структурно-неоднородных материалах с помощью ультразвуковых и металлографических исследований. *Металлургия и материаловедение*, 3, 221–227.
5. Levesque D., Lim C. S., Padioleau C., Blouin A. (2011) Measurement of texture in steel by laser-ultrasonic surface waves. *Journal of Physics: Conference Series*, 278, 1–4.
6. Скальський В. Р., Назарчук З. Т., Гірний С. І. (2012) Вплив електролітично поглиненого водню на модуль Юнга конструкційної сталі. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, 4, 68–75.
7. Безьянний Ю. Г., Козирацкий Е. А. (2006) Отображение свойств волокнистых материалов по скорости распространения упругих волн. *Акустичний вісник*, 1, 15–20.
8. Запорожец О. И., Дордиенко Н. А., Михайловский В. А. (2016) Акустические и упругие свойства составляющих стенки корпуса реактора ВВЭР-440. *Металлофизика и новейшие технологии*, 6, 795–813.
9. Муравьев В. В., Зуев Л. Б., Комаров К. Л. (1996) *Скорость звука и структура стали и сплавов*. Новосибирск, Наука.
10. Черемской П. Г., Слезов В. В., Бетехин В. И. (1990) *Поры в твердом теле*. Москва, Энергоатомиздат.

11. Шутилов В. А. (1980) *Основы физики ультразвука*. Изд-во, Ленинград, универ.
12. Адамеску Р. А., Гельд П. В., Митюшов Е. А. (1985) *Анизотропия физических свойств металлов*. Москва, Металлургия.
13. Никитина Н. Е. (2005) *Акустоупругость. Опыт практического применения*. Нижний Новгород, Талам.
14. Труэл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. (1972) *Ультразвуковые методы в физике твердого тела*. Москва, Мир.

**References**

1. Nazarchuk, Z.T., Skalskyi, V.R. (2009) Acoustic-emission diagnostics of structure elements: Manual, in 3 Vol. Vol. 2: *Methodology of acoustic-emission diagnostics*. Kyiv, Naukova Dumka [in Ukrainian].
2. Erofeev, V.I., Nikitina, E.A. (2010) Matched dynamic problem of material damage evaluation by acoustic method. *Fiz. Osnovy Tekh. Diagnostiki*, 56(4), 554-557 [in Russian].
3. Mishakin, V.V., Kassina, N.V., Gonchar, A.V. et al. (2008) Acoustic method of damage evaluation of materials and structures under force loading. *Vestnik Nauchno-Tekhnicheskogo Razvitiya*, 5, 61-66 [in Russian].
4. Gonchar, A.V., Mishakin, V.V. (2012) Evaluation of plastic deformation value in structurally-inhomogeneous materials using ultrasonic and metallographic examinations. *Metallurgiya i Materialovedenie*, 3, 221-227 [in Russian].
5. Levesque, D., Lim, C.S., Padioleau, C., Blouin, A. (2011) Measurement of texture in steel by laser-ultrasonic surface waves. *J. of Physics: Conference Series*, 278, 1-4.
6. Skalsky, V.R., Nazarchuk, Z.T., Girny, S.I. (2012) Influence of analytically-absorbed hydrogen on Young's modulus of structural steel. *Fiz.-Khimich. Mekhanika Materialiv*, 4, 68-75 [in Ukrainian].
7. Bezymyanny, Yu.G., Koziratsky, E.A. (2006) Characterization of properties of fibrous materials by velocity of elastic wave propagation. *Akustychny Visnyk*, 1, 15-20 [in Russian].
8. Zaporozhets, O.I., Dordienko, N.A., Mikhajlovsky, V.A. (2016) Acoustic and elastic properties of wall components of WWER-440 reactor body. *Metallofizika i Novejshe Tekhnologii*, 6, 795-813 [in Russian].
9. Muraviov, V.V., Zuev, L.B., Komarov, K.L. (1996) *Sound velocity and structure of steel and alloys*. Novosibirsk, Nauka [in Russian].
10. Cheremskoj, P.G., Slezov, V.V., Betekhin, V.I. (1990) *Pores in solid*. Moscow, Energoatomizdat [in Russian].
11. Shutilov, V.A. (1980) *Fundamentals of supersonics*. Leningrad, Izd-vo Leningrad. Un-ta [in Russian].
12. Adamesku, R.A., Geld, P.V., Mityushov, E.A. (1985) *Anisotropy of physical properties of metals*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
13. Nikitina, N.E. (2005) *Acoustoelasticity. Experience of practical application*. Nizhny Novgorod, Talam [in Russian].
14. Truel, R., Elbaum, C., Chick, B. (1972) *Ultrasonic methods in solid state physics*. Moscow, Mir [in Russian].

ОЦЕНКА ПОВРЕЖДЕННОСТИ ФЕРРИТНО-ПЕРЛИТНОЙ СТАЛИ ПО ВЕЛИЧИНЕ ИЗМЕНЕНИЯ СКОРОСТИ ПРОДОЛЬНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ

В. Р. СКАЛЬСКИЙ, О. М. МОКРЫЙ

Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко НАН Украины. 79060, г. Львов, ул. Научная, 5 E-mail: skalsky.v@gmail.com, mokomo@lviv.farlep.net

Получена количественная характеристика изменения скорости продольной акустической волны и плотности в ферритно-перлитной стали в результате пластической деформации. Показана возможность оценивать величину поврежденности, которая возникла в результате пластической деформации, по изменению скорости акустической волны. На основе экспериментальных данных установлена корреляционная зависимость между изменением скорости и поврежденности в виде полинома третьей степени. Библиогр. 14, рис. 3.

Ключевые слова: пластическая деформация, поврежденность, скорость акустической волны, плотность

EVALUATION OF DAMAGE LEVEL IN FERRITIC-PEARLITIC STEELS BY THE VALUE OF THE CHANGE OF LONGITUDINAL ACOUSTIC WAVE VELOCITY

V. R. SKALSKYI, O. M. MOKRYI

G. V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, 5 Naukova str., 79060, Lviv, Ukraine E-mail: skalsky.v@gmail.com, mokomo@lviv.farlep.net

Quantitative characteristic of the change of velocity of a longitudinal acoustic wave and density in ferritic-pearlitic steel as a result of plastic deformation was obtained. Possibility of evaluation of the level of damage that is due to plastic deformation by the change of acoustic wave velocity is demonstrated. Experimental data were the base for correlating the change of velocity and damage level in the form of a third-degree polynomial. 14 References, 3 Figures.

Keywords: plastic deformation, damage level, acoustic wave velocity, density

Надійшла до редакції  
22.01.2018



Национальная академия наук Украины  
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ  
АО «Мотор Сич»  
ПАО «Институт титана»  
Запорожский национальный технический университет  
Международная Ассоциация «Сварка»



Международная конференция

**«Титан 2018. Производство и применение в Украине»**

Посвящается 100-летию Национальной академии наук Украины

Киев, ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины  
11–13 июня 2018

[www.pwi-scientists.com/rus/titan2018](http://www.pwi-scientists.com/rus/titan2018)

# КОНТРОЛЬ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТРУБОПРОВОДІВ ЗА ДОВГОТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ У ВОДНЕВОВМІСНОМУ РОБОЧОМУ СЕРЕДОВИЩІ

С. З. СТАСЮК

Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України, 01014, м. Київ, вул. Тимирязевська, 2.  
E-mail: stasiuk-ipp@list.ru

Розглянуто методичні підходи до експертної оцінки технічного стану технологічних трубопроводів, по яких транспортуються горючі і вибухонебезпечні середовища, що містять від 60 до 90 % об. водню в суміші з рідкими чи пароподібними вуглеводами, сірководнем та іншими компонентами. Бібліогр. 14, табл. 7, рис. 9.

*Ключові слова:* технологічні трубопроводи, каталітичний риформінг, воднева корозія, металографічні дослідження, механічні випробування, механічні властивості, ресурс безпечної експлуатації

Гідрогенізаційні процеси при каталітичному риформінгу відносяться до основних технологічних процесів у нафтопереробних і нафтохімічних виробництвах, при яких внаслідок циклів реакції здійснюється приєднання водню до різних речовин в умовах високих температур 420...550 °С та тиску 0,1 до 70 МПа. В умовах довготривалого контакту металу з водневовмісним середовищем за температур 260...550 °С та тиску 2,1...6,6 МПа метал насичується воднем і, внаслідок цього виникає воднева корозія – зневуглецювання сталі або воднева крихкість – втрата металом пластичності, що викликана утворенням і розвитком тріщин внаслідок скопичення водню на різних дефектах (дислокаціях, вакансіях, міжзеренних границях тощо). Дані досліджень впливу водню на механічні властивості конструкційних сталей [1–3] показують, що дія водню не проявляється на механічних характеристиках, не пов'язаних з руйнуванням: опір пластичній деформації, модуль пружності, рівномірна деформація, але різко проявляється на зниженні граничних характеристик, пов'язаних з руйнуванням, таких як міцність, відносне видовження і відносне звуження, а також твердість і ударна в'язкість.

Хромомолібденові сталі, що широко використовуються в конструкціях обладнання нафтопереробних виробництв, відрізняються незалежністю границі плинності за кімнатної і робочих температур від тривалості експлуатації при 420...525 °С, а характеристики пластичності, які за кімнатної температури також не залежать від тривалості експлуатації, за робочої температури підвищуються з часом, при чому підвищення відносного видовження відбувається швидше, ніж збільшення відносного звуження. З урахуванням цих обставин в якості показника зміни механічних

властивостей металу після тривалої експлуатації доцільно розглядати відношення границі міцності сталі при робочій температурі до такої за температури 20 °С і оцінювати тим самим експлуатаційну надійність напрацьованого металу [4].

В установках каталітичного риформінгу особливою відповідальність мають трубопроводи реакторних блоків, по яких транспортуються горючі і вибухонебезпечні середовища, що містять від 60 до 90 % об. водню в суміші з рідкими чи пароподібними вуглеводами, сірководнем та іншими компонентами. Вони знаходяться під дією високих температур і значних тисків, піддаються корозії і внаслідок регенеративного режиму роботи установок зазнають періодичних охолоджень і нагрівів, що призводить до розладу фланцевих з'єднань, порушень герметичності, а при недостатньому експлуатаційному контролі за станом – і до руйнування трубопроводів [2], тому до їх надійності, міцності і безпечності в експлуатації висувають високі вимоги.

Надійність роботи технологічних трубопроводів гарантується своєчасним контролем їх технічного стану, суворим дотриманням технологічного режиму, а також дотриманням вимог нормативних документів щодо нагляду за безпечною експлуатацією. Експертиза промислової безпеки об'єктів підвищеної небезпеки на нафтопереробних заводах, що відпрацювали проектний строк служби, передбачає експертне обстеження (технічне діагностування) [5, 6], метою якого є контроль технічного стану з використанням традиційних методів неруйнівного контролю для виявлення експлуатаційних дефектів і оцінка залишкового ресурсу. Для технологічних трубопроводів необхідно уточнення поняття залишкового ресурсу, яке прийнято визначати сумарним напрацюванням від моменту контролю технічного



стану до переходу в граничний стан [5]. Оскільки трубопровід являє собою об'єкт, що складається з окремих елементів (труб, з'єднаних зварюванням, фасонних деталей, фланців, арматури тощо), граничний стан усіх його елементів не може бути досягнений одночасно. До такого об'єкту застосовується поняття призначений ресурс (або призначений строк служби), який відраховується від моменту контролю його технічного стану, і на протязі якого забезпечується роботоздатність основних елементів – труб і зварних з'єднань. Ресурс (строк служби) подовжується поетапно і термін наступного технічного діагностування встановлюється на основі отриманих під час експертного обстеження результатів, а також аналізу властивостей матеріалу, напрацювання якого відбувалося в умовах впливу водневомісного середовища високих параметрів.

Нормативно-правовим документом НПА ОП 0.00-6-09-10 [5] встановлено порядок проведення експертного обстеження технологічних трубопроводів гідрогенізаційних установок, за вимогами якого контролю технічного стану з обов'язковим проведенням лабораторних досліджень властивостей металу піддають трубопроводи, які виготовлені з низьколегованих хромо молібденових сталей після їх напрацювання 150000 год.

Якщо зміна механічних властивостей відбувалась за рахунок старіння металу під дією високої температури в період тривалої експлуатації, термічним обробленням шляхом високотемпературного нагрівання в області температур аустенітного стану можна відновити властивості металу, наблизивши їх до первісних [7]. Таке відновлювальне термічне оброблення має назву ВТО. Але, якщо незворотні процеси водневої корозії розпочаті, то вказаним ВТО властивості сталі не відновлюються. Вплив водню на механічні властивості сталі оцінений шляхом порівняння характеристик металу в стані напрацювання (в умовах експлуатації), з такими металу, що пройшов ВТО, подається як відношення [7]:

$$\left(\frac{\sigma_{\text{вод}}}{\sigma_{\text{то}}}\right) 100 \% \text{ і } \left(\frac{\psi_{\text{вод}}}{\psi_{\text{то}}}\right) 100 \%,$$

де  $\sigma_{\text{вод}}$  і  $\psi_{\text{вод}}$  – границя міцності і відносне звуження металу в стані напрацювання у водневомісному середовищі;  $\sigma_{\text{то}}$  і  $\psi_{\text{то}}$  – границя міцності і відносне звуження металу, що пройшов ВТО.

Таким чином, воднева стійкість металу і збереження його службових властивостей після тривалої експлуатації може бути оцінена за такими показниками:

– вмістом вуглецю в металі, визначеному за результатами контрольного хімічного аналізу, що має відповідати діючим стандартам на марку сталі. При цьому поверхневе і приповерхневе

зневуглецювання треба оцінювати за показниками мікротвердості;

– вмістом водневостійких карбідів по всій товщі металу як до, так і після ВТО за результатами металографічного аналізу;

– за порівняльною характеристикою механічних властивостей матеріалу до і після ВТО.

Оцінка, яка здійснюється за такими показниками, має визначити працездатність металу в заданих умовах експлуатації і встановлювати можливість його подальшої безпечної експлуатації.

Такі підходи були використані при контролі технічного стану технологічних трубопроводів реакторних блоків установок каталітичного риформінгу ЛГ-35-11/300 двох нафтопереробних виробництв. Під час проведення експертного обстеження згідно з вимогами [5] для лабораторних досліджень поступили «котушки» із зварними швами, що були вирізані з технологічних трубопроводів риформінгу (рис. 1).

**Матеріал трубопроводів, структурні особливості.** Виготовлювач установок – Магдебурський завод важкого машинобудування (Німеччина). Матеріал трубопроводів за даними заводських сертифікатів – сталь марки 10CrMo9.10 (DIN 17176) [8]. Вітчизняним аналогом таких труб є труби зі сталі марки 1Х2М1 ТУ 14-3-517-76. На час експертних обстежень фактичне напрацювання трубопроводів за робочими параметрами, обумовленими циклом реакції – тиском 5,0 МПа і температурою 525 °С в умовах водневомісного середовища (газ із вмістом водню до 85 % об., сірководню до 0,005 % об.), склало 204500 год (трубопровід 1) і 245800 год (трубопровід 2). Зварні шви були виконані ручним дуговим зварюванням електродами типу Cr2Mo1 TGL 24-13.7 [8] з використанням технології термооброблення: попереднє нагрівання до 250...300 °С, відпалювання після зварювання за температури 730...780 °С на протязі 90 хв і охолодження на повітрі.

Для зіставлення властивостей металу трубопроводів ВТО проводилось за наступним режимом [7]: нормалізація при 950 °С (нагрівання металу понад температури  $A_{\text{с3}}$ , при якій відбувається



Рис. 1. Загальний вигляд зразка, вирізаного з трубопроводу риформінгу

повне перетворювання в аустеніт, на протязі 20 хв і відпуск при 720 °С на протязі 1 год (для зняття структурних напруг і утворення водневостійких карбідів).

Отриманими результатами аналізу хімічного складу підтверджена відповідність вмісту хімічних елементів сертифікатам виробника (табл. 1). Як видно з таблиці, за складом вуглецю, карбидоутворюючих елементів, а також домішків сірки і фосфору матеріал труб повністю відповідає вимогам стандарту на сталь марки 10CrMo9.10 DIN 17176 [8] (TGL 9012 – державний стандарт НДР, за яким здійснювалося постачання труб під час виготовлення і монтажу установок каталітичного риформінгу у 1971 році) і може бути ідентифікований як вітчизняний аналог цієї сталі – сталь марки 1Х2М1 ТУ 14-3-517-76 [9], а електрод, яким виконано зварний шов, повністю відповідає вітчизняному аналогу – електроду типу Э-09Х2М1 за ГОСТ 9467-75 [10].

Металографічний аналіз, проведений з метою вивчення можливих змін мікроструктури основного металу і зварних з'єднань труб внаслідок тривалої експлуатації (табл. 2), показав наступне.

**Труба 1.** В основному металі присутні у великій кількості неметалеві включення типу шпінелі FeO·MnO (до 5 %) довжиною 0,05...0,06 мм і завширшки 0,01...0,02 мм. Наявні також оксиди точкові; дуже дрібні і дещо більші пори (до 0,02 мм). Макроструктура металу зварного з'єднання представлена на рис. 2, а. В металі зварного шва спостерігаються, головним чином, оксиди точкові. Зварне з'єднання виконано стиковим багатопрхідним одностороннім швом з V-подібним розкриттям кромки. В металі кореня шва виявлено дефект д1, що являє собою угнутість кореня шва з усадочною раковиною (дефект д2), розміром приблизно 0,70...0,52 мм. В верхній частині дефекту д2 після травлення (з метою виявлення мікроструктури за великими збільшеннями) виявлені мікротріщини, утворення яких, вірогідно, пов'язане з пітинговою корозією. Схема дослідження мікроструктури різних зон зварного з'єднання представлена на рис. 2, б.

Структура металу труби зі сталі 10CrMo9.10, що відноситься до хромистих сталей мартенситного класу, являє собою феритно-карбідну суміш (з незначною кількістю бейніту відпуску) і дрібнозернистий перліт (сорбіт відпуску). Вона ха-

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

Об'єкт дослідження	Склад елементів, %								
	C	Cr	Mo	Mn	Si	S	P	Ni	Cu
Результати дослідження:									
метал труби									
1	0,134	2,00	1,10	0,487	0,024	<0,005	<0,01	0,018	0,102
2	0,140	2,05	1,12	0,500	<0,01	0,025	<0,01	0,11	0,140
метал шва труби									
1	0,12	5,14	0,57	0,57	0,34	<0,005	<0,01	0,08	0,090
2	0,08	2,24	9,52	1,09	0,38	0,003	<0,005	0,095	0,168
10CrMo9.10 TGL9012 (DIN 17176)	0,08...0,14	2,0...2,5	0,90...1,10	0,40...0,80	≤0,50	≤0,025	≤0,030	–	≤0,30
Сталь 1Х2М1 (ТУ 14-3-517-76)	0,08...0,13	2,0...2,5	0,90...1,10	0,30...0,60	0,17...0,37	<0,035	<0,035	<0,50	<0,30
Електрод типу Э-09Х2М1 ГОСТ 9467-75	0,06...0,12	1,9...2,5	0,80...1,10	0,5...1,0	0,15...0,45	<0,025	<0,035	–	–

**Таблиця 2.** Характеристики структури основного металу і зони термічного впливу трубопроводу 2 зі сталі марки 10CrMo9.10 з напрацюванням 245800 год

Місце дослідження	Протяжність ділянок ЗТВ*, мм	Номер зерна перліту, бали	Співвідношення фериту і перліту, %		Дисперсність перліту (сорбіту)	
			Ферит	Перліт	Бал	Розмір карбідів, мкм
Основний метал		9,10 (8)	5	95 (100)	1, 2	≤20,40
Зона сплавлення		10, 11 (8, 9)	–	100	–	–
*Ділянка 1		7 (8)	–	100	1, 2	≤20,40
2		7 (8, 9)	–	100	2	40
3		10, 11 (9, 10)	–	100	1, 2	≤20,40
4		8, 9 (9, 10)	–	100	1, 2	≤20,40
Метал шва		верх – 9,10 (6, 7) низ – 11,12 (9) центр – 14 (6,7)	–	100	центр 2, 3	центр 0,40...0,60

*Примітки:* 1. \*Ділянки ЗТВ: 1 – неповного розплавлення; 2 – перегріву; 3 – нормалізації; 4 – неповної перекристалізації.  
2. У дужках наведені дані показників, що змінилися після ВТО.

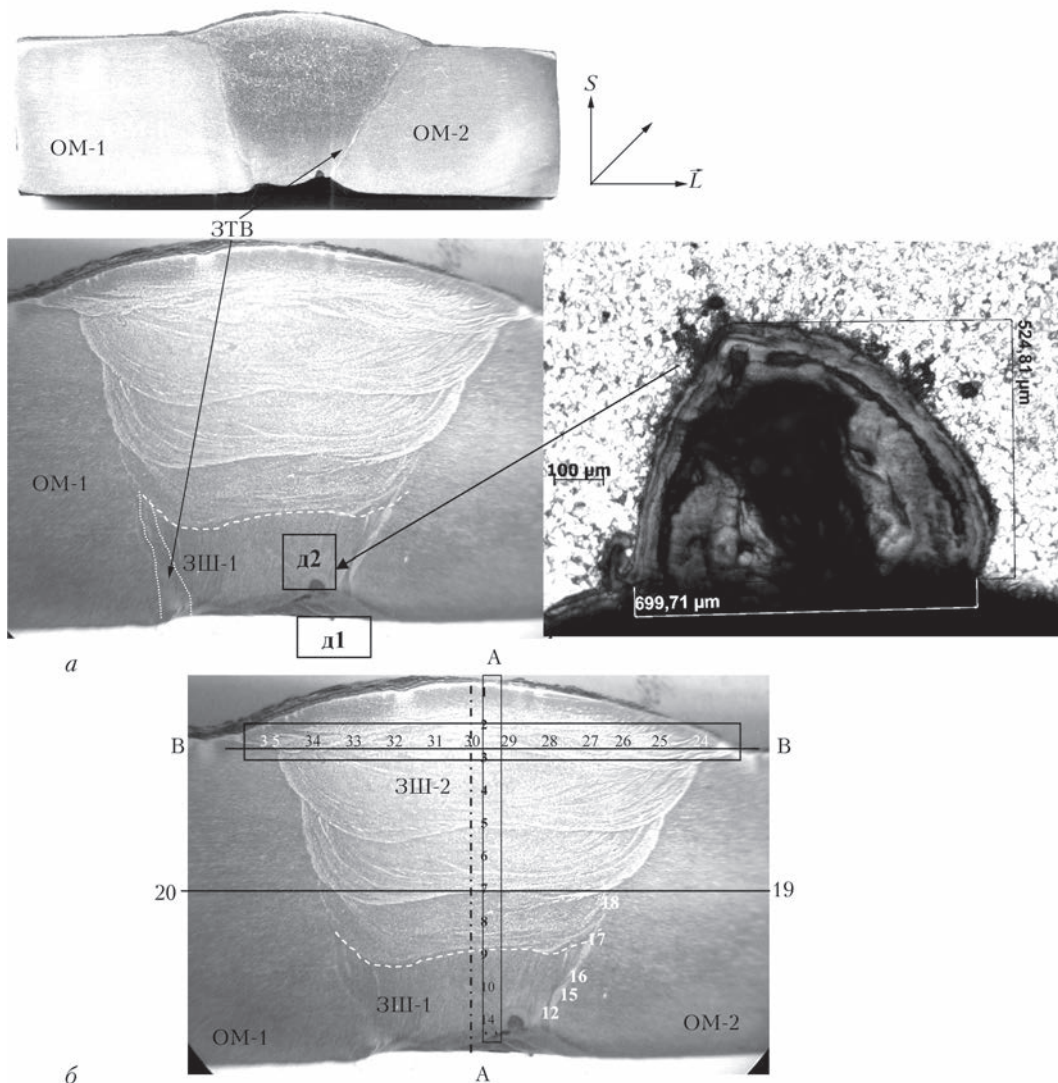


Рис. 2. Темплет для досліджень зварного з'днання труби із сталі 10CrMo9.10 в площині шліфу ( $L-S$ ) в стані напрацювання 204500 год: *а* – макроструктура; *б* – схема досліджень мікроструктури різних зон зварного з'днання; OM-1, OM-2 – основний метал, ЗТВ – зона термічного впливу; ЗШ – зварний шов; ЗШ-1 – корінь шва; д1 і д2 – дефекти в металі зварного шва

рактизується рядковістю (рис. 3, *а*). Середній розмір феритних зерен знаходиться у межах 10...20 мкм. В металі наявні пори і витягнуті сульфідні виділення. Мікротвердість  $HV$  дорівнює 1600...1800 МПа. Після ВТО збільшився вміст бейніту відпуску, відбулося подрібнення структурних складових майже у 1,5...2 рази (рис. 3, *б*). При цьому рядковість структури збереглася, проте збільшилася пористість. Мікротвердість практично не змінилася.

Мікроструктура металу шва характеризується неоднорідністю і змінюється по його товщині. Ілюстрацією цього слугує рис. 4, на якому показано зміни структури уздовж середньої лінії А-А (див. схему рис. 2, *б*). Так, у верхній частині зварного шва (рис. 4, *а*) переважає суміш крупного поліедричного фериту з перлітом, бейнітом відпуску і карбідами (різномірність фериту в межах 20...60 мкм і його середній розмір приблизно 40 мкм). Мікротвердість  $HV$  металу шва у верх-

ній частині, складає 1900...2100 МПа, при цьому мікротвердість окремих структурно вільних зерен фериту дорівнює 1500 МПа. В напрямку до кореня шва мікроструктура стає більш дрібнозернистою (рис. 4, *б*). Тут середній розмір зерна фериту становить 30 мкм при різномірності у 20...40 мкм; мікротвердість металу шва цієї області знаходиться у межах 1600...1900 МПа. Мікроструктура кореня шва (див. ЗШ-І на рис. 2, *б*) – феритно-карбідна суміш (рис. 4, *в*) з невеликою кількістю зернистого перліту. В нижній частині кореня шва середній розмір фериту становить 20 мкм; мікротвердість металу шва  $HV$  в межах 1600...1800 МПа. Після ВТО спостерігалось значне подрібнення структурних складових – в 1,5...2 рази (рис. 4, *а, б, в*). При цьому мікротвердість  $HV$  зменшилась від 2020 МПа у верхній частині шва до 1600...1700 МПа у нижній частині.

Зона термічного впливу (ЗТВ) практично відсутня у верхній частині шва і ледве іден-

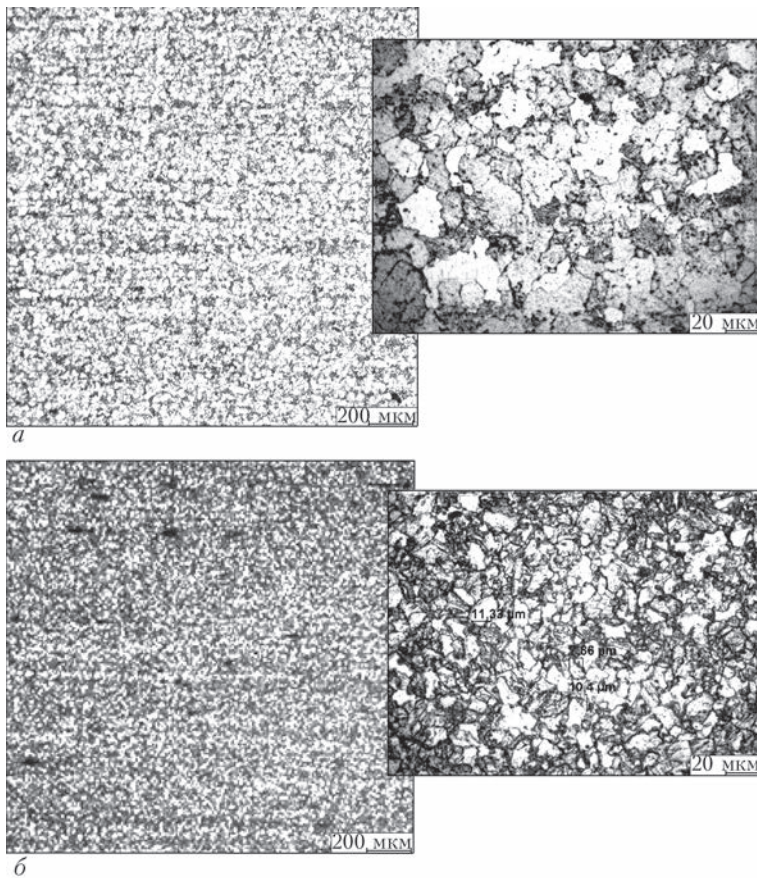


Рис. 3. Мікроструктура основного металу труби: а – в стані напрацювання 204500 год; б- після ВТО

тифікується в нижній за шириною 200...300 мкм з боку ОМ-2 і приблизно 500 мкм з боку ОМ-1 (рис. 5). Мікроструктура ЗТВ – це суміш фериту, зернистого перліту, бейніту відпуску та карбідів. Мікротвердість металу у межах 1600...1700 МПа; середній розмір феритних зерен порядку 10 мкм. Після ВТО мікроструктура майже не змінилась, тільки виріс розмір феритних зерен на 40...50 % (рис. 6).; мікротвердість практично не змінилась.

**Труба 2.** Характеристики структури основного металу і ЗТВ приведені в табл. 2. Мікроструктура металу являє собою дрібнозернистий перліт (сорбіт відпуску) 1, 2 балу дисперсності з розміром частинок капбідів типу  $Me_{23}C_6$  і  $Me_7C_4$  в межах 20...40 мкм. Феритна складова в металевій матриці не більше 5 %, величина зерен перліту 9, 10 розміру (рис. 7, а). Мікротвердість *HV* структурних складових по товщині труби становить 2032...2232 МПа (табл. 3).

Мікроструктура металу шва представлена на рис. 8. Мікротвердість металу шва з боку зовнішньої поверхні труби дорівнює 1986 МПа, з боку внутрішньої поверхні – 2129 МПа, в корені шва – 1938 МПа (табл. 3). Мікроструктура ЗТВ зварного з'єднання представлена на рис. 9. Зона сплавлення не має чітких границь і шов плавно переходить в ділянку неповного розплавлення навколошовної зони, яка має протяжність

0,05...0,07 мм; величина зерна перліту на цій ділянці відповідає 7, 8 номерам; дисперсність зернистого перліту складає 1, 2 бали. Ділянка перегріву має протяжність 0,40...0,50 мм із зернами перліту 7 номеру; дисперсність перліту (сорбіт) – 2 бали. Ділянка нормалізації протяжністю 0,7...0,8 мм з номером зерна перліту 10, 11 і дисперсністю – 1, 2 бали. Ділянка неповної перекристалізації протяжністю до 1,0 мм має зерна перліту величиною 8, 9 номерів; дисперсність зернистого перліту складає 1, 2 бали. Мікротвердість *HV* різних ділянок зони термічного впливу відрізняється несуттєво і знаходиться в межах 1938...2129 МПа.

Дослідження показали, що структура металу і зварних з'єднань трубопроводу 2, як і трубопроводу 1, також не зазнала змін внаслідок довготривалої експлуатації в робочих умовах. Після ВТО в мікроструктурі основного металу зник вільний ферит і його структура почала повністю складатися з сорбіту відпуску. В порівнянні з металом в стані напрацювання величина зерна не змінилася у зовнішній поверхні і в центральній частині перерізу, проте у внутрішній поверхні труби збільшилася на 1, 2 номери.

Дисперсність карбідів в основному металі майже не змінилася, але їх розподіл став менш рівномірний. Внаслідок ВТО підвищилася схильність до коагуляції карбідів як в основному металі, так і в ЗТВ зварного шва, при цьому щільність карбідної фази зменшилася; спостерігався вирівнюючий вплив термооброблення на мікроструктуру ЗТВ, особливо на ділянки навколошовної зони. Мікротвердість основного металу підвищилася на 200...400 одини-

Таблиця 3. Мікротвердість окремих зон металу зварного з'єднання труби з напрацюванням 245800 год

Місце дослідження		Мікротвердість <i>HV</i> , МПа	
		Напрацювання	Після ВТО
Метал шва	верх	1986	2620
	виз	2129	2580
	корінь	1938	2460
Зона сплавлення		1733	2820
Зона неповного розплавлення		2129	2445
Зона перегріву		2032	2410
Зона нормалізації		1938	2470
Зона неповної перекристалізації		1938	2390
Основний метал	зовн. поверхність	2032...2231	2460...2580
	внутр. поверхність	2032...2232	2240...2420

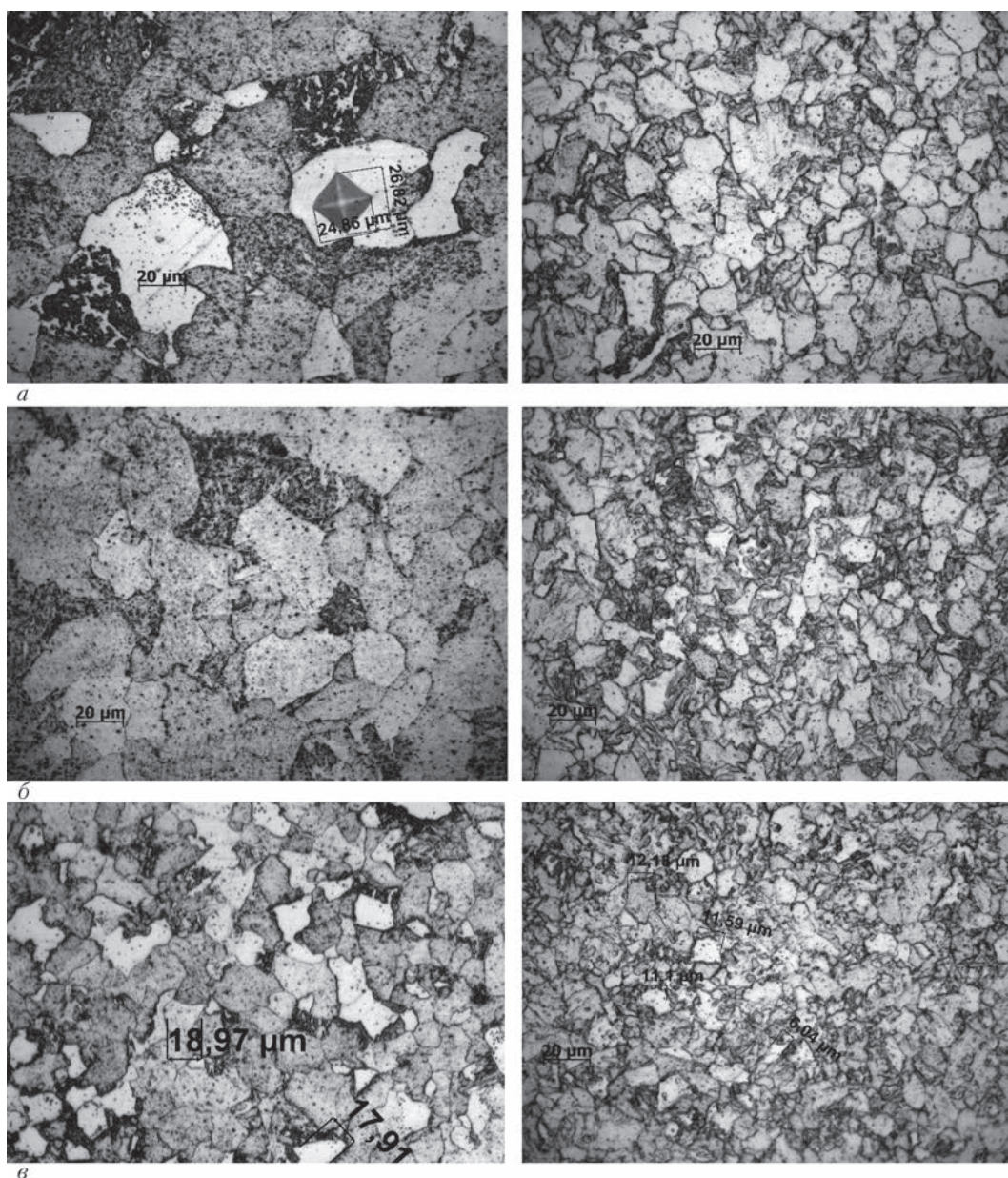


Рис. 4. Порівняльні фрагменти зміни мікроструктури металу зварного шва в стані напрацювання 204500 год і після ВТО: а – верхня частина шва; б – центр шва; в – корінь шва

Таблиця 4. Механічні характеристики основного металу труб з напрацюванням/після ВТО

Температура випробувань, °С	Границя міцності $\sigma_b$ , МПа	Границя текучості $\sigma_{0,2}$ , МПа	Відносне видовження, $\delta$ , %	Відносне звуження $\psi$ , %	Твердість $HV$
Труба 1 з напрацюванням 204500 год					
20	493,4/619,8	265,0/515,7	36,0/24,8	67,9/68,0	191/216
525	269,2/464,9	160,1/385,8	27,1/21,4	62,2/65,3	-
Труба 2 з напрацюванням 245800 годин					
20	500,0/649,0	275,0/539,0	33,1/22,7	75,1/76,4	-
525	470,0/484,0	188,0/397,0	31,8/22,0	73,5/79,8	-
550	276,0/462,0	185,0/395,0	41,5/24,0	77,1/82,5	-
Стандарт TGL 9012 (DIN 17176) на сталь марки 10CrMo9.10 [8]					
20	480...630	290	18	55	130...175/-
500	-	180	-	-	-
ТУ 14-3-517-76 на сталь марки 1X2M1 [9]					
20	450	270	20	45	>235/-

Примітка. За вимогою [14] для основного металу сталі 1X2M допустимі межі твердості  $HV$  161...227.

ць, металу шва на 400..500 одиниць, металу ЗТВ на 300...500 одиниць. Мікротвердість зони сплавлення збільшилась на 1100 одиниць.

**Результати механічних випробувань.** Для контролю механічних властивостей матеріалу досліджуваних труб проводили механічні випробування відповідно до вимог стандартів і нормативних документів (НД): на розтяг, ударну в'язкість і твердість. Комплекс механічних характеристик, які отримано за кімнатної і робочої температур як у стані напрацювання, так і після відновлювального термічного оброблення, наведено в табл. 4–6.

**Труба 1.** За результатами оцінки випробувань на розтяг основний метал в стані напрацювання (після тривалої експлуатації 204500 год) за температури випробувань 525 °С показав різке зниження  $\sigma_B$  і  $\sigma_T$  (в середньому в 1,7 рази) в порівнянні з кімнатною температурою (табл. 4). Проте отримані характеристики міцності і пластичності відповідають вимогам нормативних документів щодо цієї марки сталі. Внаслідок ВТО спостерігається збільшення границі міцності  $\sigma_B$  основного металу за температури 20 °С на 25 %, а умовної границі плинності – майже у два рази; при цьому  $\delta$  зменшилось на 30 %, а  $\psi$  практично не змінилось. За температури 525 °С тенденція до змін механічних характеристик збереглася.

З урахуванням вимог до властивостей металу при оцінці його якості, за якими для легованих сталей відношення межі текучості до границі міцності  $\sigma_{0,2}/\sigma_B$  за кімнатної температури не повинно перевищувати 0,8, можна стверджувати, що це відношення для матеріалу в стані напрацювання за результатами наших досліджень становить 0,55 і відносне видовження після розриву  $\delta$  знаходиться на рівні 36 %, що майже у два рази перебільшує вимоги [8] (18 %) і [9] (20 %). Після ВТО відношення  $\sigma_{0,2}/\sigma_B$  дорівнює 0,83, а  $\delta$  – на рівні 23 %. Це є свідченням того, що довготривала дія експлуатаційних факторів (температури, тиску, середовища) не призвела до змін властивостей основного металу трубопроводу. Критеріальна оцінка роботоздатності напрацьованого при високих температурах матеріалу, визначена за відношенням  $\sigma_B'/\sigma_B^{20}$  [11], показала, що за експериментальними даними  $\sigma_B^{525}/\sigma_B^{20}$  становить 0,60, а для матеріалу після ВТО – 0,70. Це практично не дуже відрізняється від значень, що можна отримати для матеріалу труб в стані постачання (вихідний стан) за нормативними даними, по яких цей показник становить 0,60. Таким чином, одержані дані показують високу

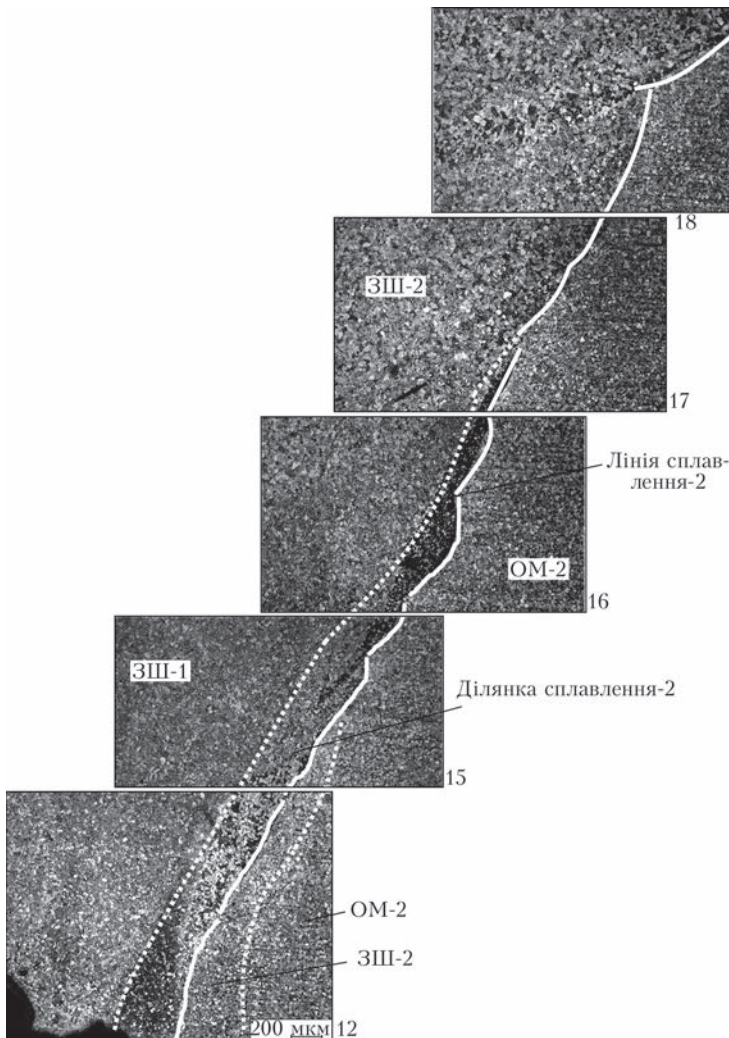


Рис. 5. Панорама мікροструктури зварного з'єднання уздовж лінії сплавлення в стані напрацювання 204500 год згідно схеми рис. 2 а

Таблиця 5. Механічні характеристики зварного з'єднання труб з напрацюванням/після ВТО

Температура випробувань, °С	Границя міцності $\sigma_B$ , МПа	Границя текучості $\sigma_{0,2}$ , МПа	Відносне видовження $\delta$ , %	Відносне звуження $\psi$ , %
Труба 1 з напрацюванням 204500 год				
20	510,9/613,6	260,0/520,0	24,7/24,5	68,8/73,9
525	319,3/479,4	211,4/391,0	23,6/19,2	68,1/73,2
Труба 2 з напрацюванням 245800 годин				
20	498,0/624	264,0/526	24,5/22,2	73,1/77,0
525	313,0/488,0	216,0/398,0	23,5/17,5	73,5/76,6
550	285,0/456,0	206,0/383,0	22,7/18,4	75,4/81,7

роботоздатність металу труб і відсутність впливу тривалої експлуатації на механічні властивості,

що також підтверджується даними металографічних досліджень, за якими зміни мікроструктури не спостерігаються. Критерії водневостійкості матеріалу трубопроводу, оцінені за відношеннями  $\sigma_B^{вод} / \sigma_B^{то}$  і  $\psi^{вод} / \psi^{то}$ , які дорівнюють 0,8 і 0,99 відповідно, свідчать про відсутність ознак водневої крихкості металу після тривалого напруження в умовах експлуатації.

Зварні з'єднання в цілому рівномірні основному металу при температурі 20 і 525 °С (табл. 5). Після ВТО спостерігається така сама тенденція змін механічних характеристик, що і для основного металу. Так,  $\sigma_B$  збільшується на 20 %,  $\sigma_{0,2}$  – у два рази,  $\psi$  – на 7 %. Таким чином, отримані результати підтверджують позитивну критеріальну оцінку водневостійкості дослідженого матеріалу.

Результати випробування на ударний згин за температури –20, 20 і 525 °С надані в табл. 6. Основний метал труби в стані напруження має високі показники ударної в'язкості, середня величина яких становить за температури 20 °С 141 Дж/см<sup>2</sup>, а за 525 °С – 233,5 Дж/см<sup>2</sup>. За температури –20 °С значення *KCV* наближаються до нормованих величин. Між тим ВТО привело до значного збільшення *KCV* в умовах випробувань –20 і 20 °С (в 4,5 і 1,7 рази відповідно), проте при 525 °С ударна в'язкість знижується в 1,7 рази. Слід зазначити, що отримані показники ударної в'язкості основного металу повністю відповідають вимогам нормативних документів щодо сталі цієї марки [9]. У свою чергу при випробуванні зварного шва за температур –20 і 20 °С отримані незадовільні результати. Так, у серії випробувань за –20 °С отримано мінімальну величину *KCV*, а саме 5,0 Дж/см<sup>2</sup>, і це майже у 6 разів нижче критеріального

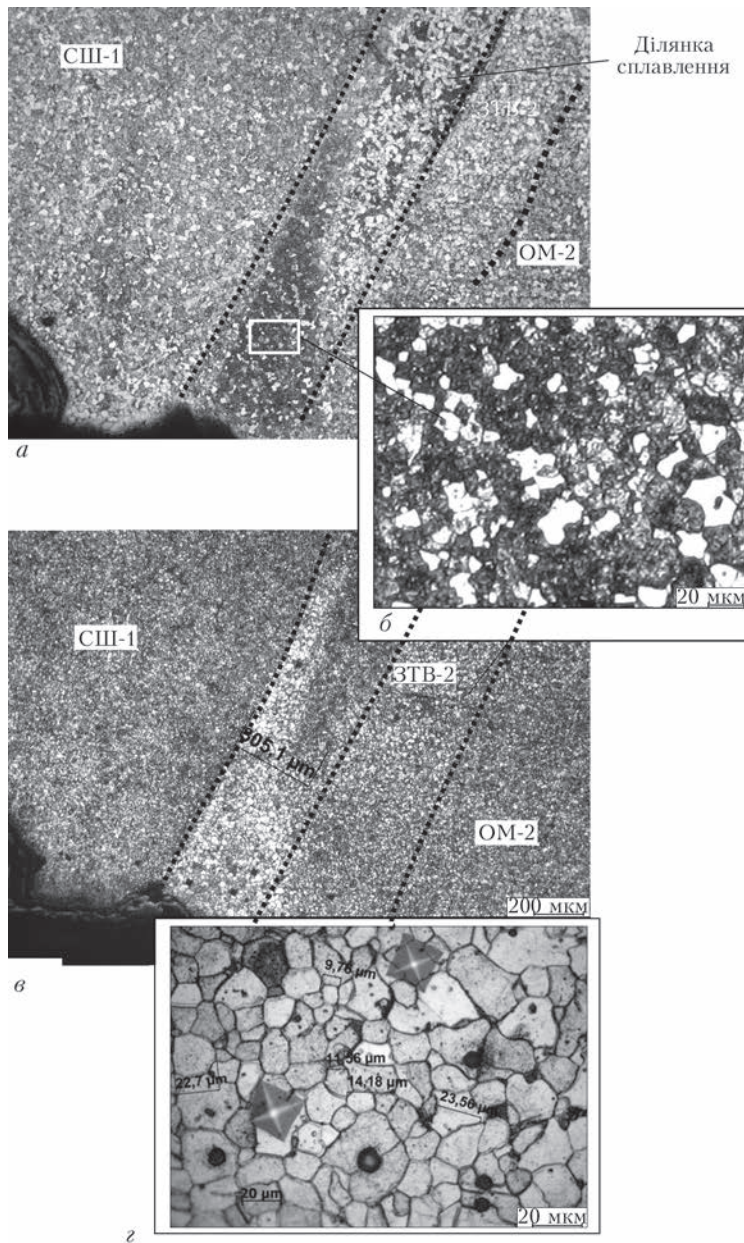


Рис. 6. Фрагменти ділянки сплавлення і зони термічного впливу (ЗТВ-2): а, б – в стані напруження 204500 год; в, г – після ВТО

Таблиця 6. Результати випробувань на ударний згин зразків труб з напруженням/після ВТО

Температура випробувань, °С	Ударна в'язкість <i>KCV</i> , Дж/см <sup>2</sup>	
	Основний метал	Зварне з'єднання
Труба 1 з напруженням 204500 год		
–20	52,0/242,0	19,5/72,4
20	141,0/240,8	42,1/126,0
525	233,0/140,5	188,5/157,4
Труба 2 з напруженням 245800 годин		
–20	48,0/247,0	21,4/69,5
20	105,0/274,0	25,9/169,5
525	311,0/202,3	184,3/172,7
550	297,7/271,0	202,7/150,7

Примітки. 1. Для основного металу за нормами ТУ 14-3-517-79 [9] для сталі 1Х2М1 величина *KCU* не менше 98 Дж/см<sup>2</sup>. 2. За нормами [12]: при 20 °С мінімальні значення *KCU* і *KCV* становлять 50 і 35 Дж/см<sup>2</sup> відповідно.

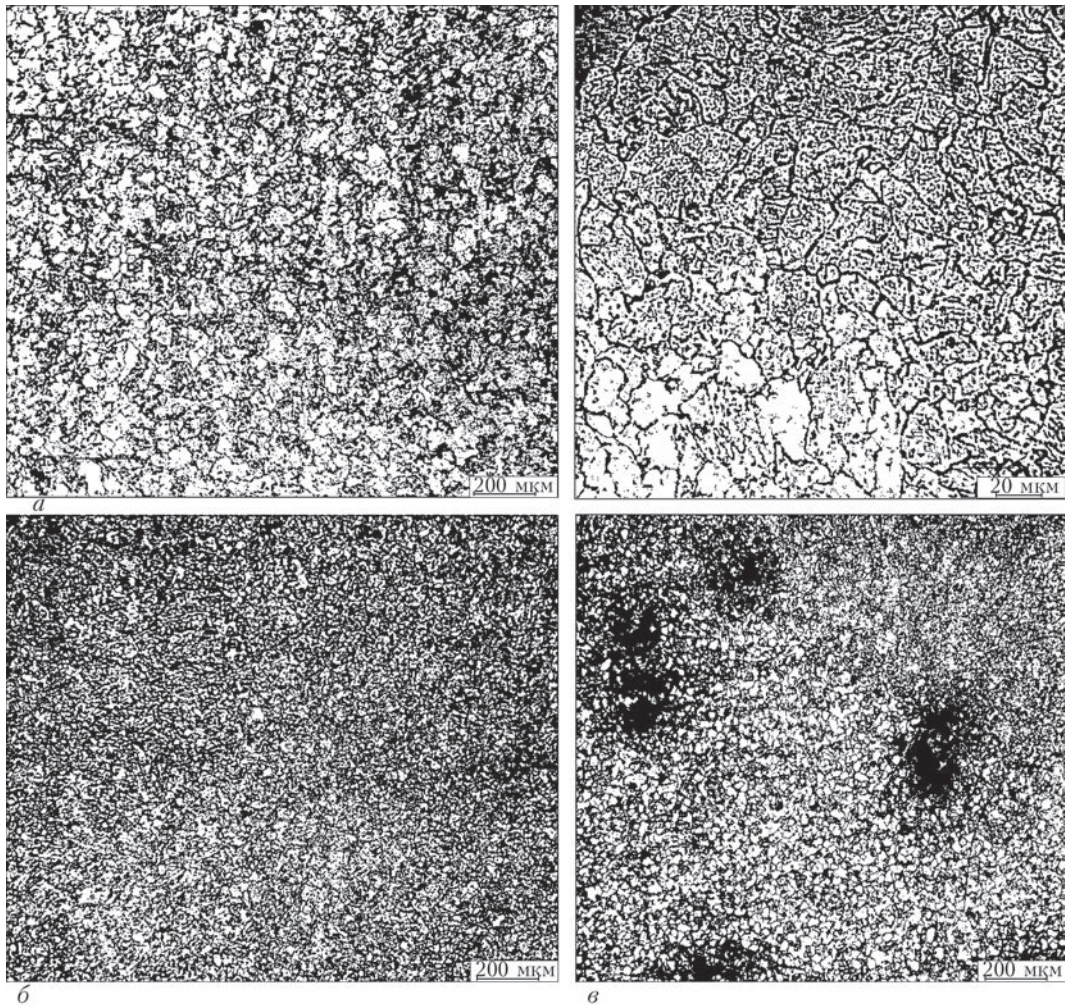


Рис. 7. Мікроструктура основного металу трубопроводу в стані напрацювання 245800 год – а; після ВТО: з боку зовнішньої поверхні труби – б; у внутрішній поверхні труби – в

значення за НПАОП 0.00-1.59-87 [11] (30 Дж/см<sup>2</sup>). При випробуваннях за 20 °С мінімальне значення *KCV* становить 31,3 Дж/см<sup>2</sup>, що в 1,6 рази нижче нормованої величини (50 Дж/см<sup>2</sup>) [12]. Слід зазначити, що за робочої температури 525 °С показники ударної в'язкості мають високі значення у межах 177,2...193,5 Дж/см<sup>2</sup>. ВТО привело до суттєвого підвищення ударної в'язкості при 20°С (із 42,1 до 126,5 Дж/см<sup>2</sup>). У той же час за температури 525 °С ударна в'язкість дещо знизилась (на 16 %), проте в цілому вона значно перебільшує нормовані величини для досліджуваної марки сталі.

**Труба 2.** Випробування зразків основного металу і зварних з'єднань труби у стані напрацювання (після тривалої експлуатації 245800 год) і після ВТО проводили за температур 20 і 525 °С з використанням не менше п'яти зразків на кожну температуру. Додатково з метою визначення резерву роботоздатності матеріалу, температура випробування була збільшена на 25 °С відповідно до робочої і становила 550 °С. Результати випробування на розтяг надано в табл. 5. Для матеріалу в стані напрацювання після тривалої експлуатації за температури випробувань 525 °С спостерігається

різке зниження  $\sigma_b$  і  $\sigma_T$  основного металу (в середньому в 1,6 рази) в порівнянні з кімнатною температурою; при цьому характеристики пластичності практично не змінюються. Між тим, для зварних з'єднань при температурі 525 °С зменшення границі міцності відбувається лише на 37 %, а границі плинності – на 18 %; характеристики пластичності, як і в основному металі, також мають сталі значення. В цілому зварні з'єднання рівномірні основному металу при температурі 20 °С, а за температури 525 °С границя плинності зварних з'єднань перевищує таку основного металу в середньому на 15 %, проте відносне видовження  $\delta$  зменшується майже на 25 %; при цьому значення  $\sigma_b$  і  $\psi$  для основного металу і зварних з'єднань практично співпадають. Подібні переміни відбуваються і за температури 550 °С.

Відновлювальне термічне оброблення привело до підвищення границі міцності  $\sigma_b$  основного металу за температури 20 °С на 30 %, а умовної границі плинності – майже у два рази; при цьому  $\delta$  знизилось на 30 %, а  $\psi$  практично не змінилось. За температури 525 °С і 550 °С спостерігається подальше збільшення  $\sigma_b$  до 60 % відносно своїх



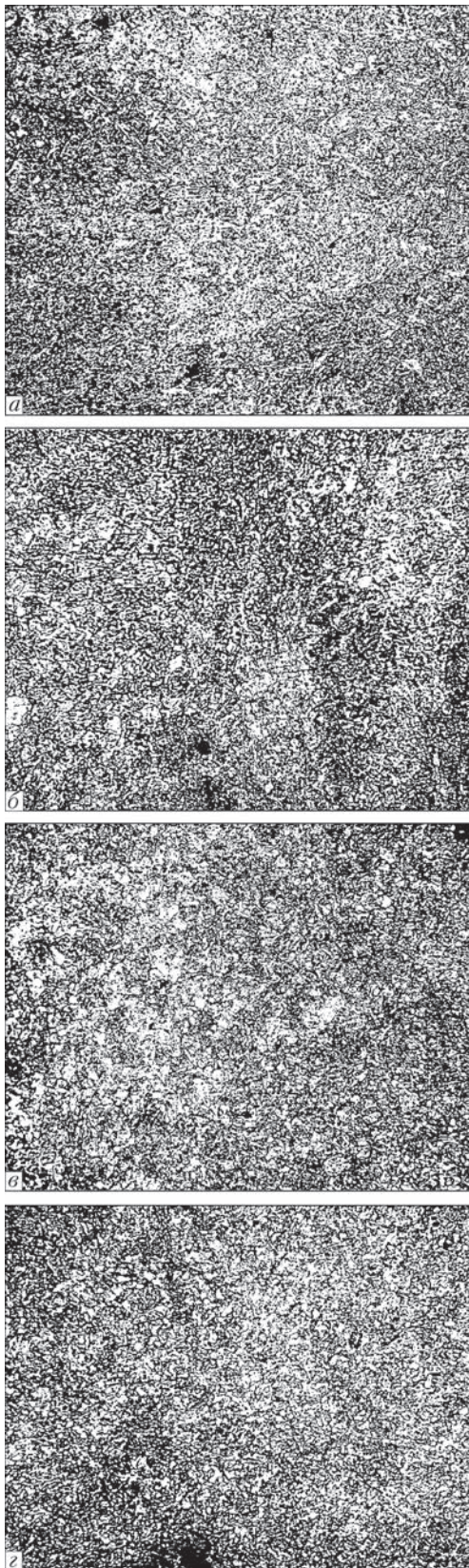


Рис. 8. Мікроструктура ( $\times 100$ ) металу зварного шва трубопроводу в стані напрацювання 245800 год (а) і після ВТО: б – вершина шва; в – центральна частина шва; г – корінь шва значень у стані напрацювання; переміни інших механічних характеристик відбуваються подібно до таких за 20 °С. Для зварних з'єднань після ВТО спостерігається така сама тенденція змін ме-

ханічних характеристик, що і для основного металу. Так, за 20 °С  $\sigma_B$  підвищується на 25 %,  $\sigma_T$  – у два рази, а  $\delta$  зменшується на 9 %; за 525 °С  $\sigma_B$  і  $\sigma_T$  збільшуються в середньому на 50 %,  $\delta$  вже знижується на 25 %. За температури 550 °С  $\sigma_B$  підвищується на 60 %,  $\sigma_T$  – в 1,9 рази, а  $\delta$  зменшується на 19 %, при цьому  $\psi$  збільшується на 8 %.

З урахуванням вимог до властивостей металу при оцінці його якості [11], по яких для легованих сталей відношення границі плинності до границі міцності  $\sigma_{0,2}/\sigma_B$  за кімнатної температури не повинно перевищувати 0,8, можна констатувати, що це відношення для матеріалу в стані напрацювання за результатами наших досліджень становить 0,55 і відносно видовження після розриву  $\delta$  знаходиться на високому рівні – 33 %, що майже в два рази перебільшує вимоги стандарту [12] (16 %). Після ВТО відношення  $\sigma_{0,2}/\sigma_B$  дорівнює 0,83, а  $\delta$  становить 23 %. Це є свідченням того, що довготривала дія експлуатаційних факторів (температури, тиску, середовища) не призвела до змін властивостей основного металу трубопроводу.

Критеріальна оцінка роботоздатності напрацьованого при високих температурах матеріалу по відношенню  $\sigma_B'/\sigma_B^{20}$  [4] показала, що за експериментальними даними  $\sigma_B^{525}/\sigma_B^{20}$  і  $\sigma_B^{550}/\sigma_B^{20}$  становить 0,60 і 0,94 відповідно, а для матеріалу після ВТО (див. табл. 3–6) – 0,74. Таким чином, отримані дані свідчать про високу працездатність металу труб і відсутність впливу тривалої експлуатації на механічні властивості, що також підтверджується даними металографічних досліджень, за якими зміни мікроструктури не спостерігаються.

Критерії водневостійкості матеріалу трубопроводу, оцінені за відношеннями  $\sigma_B^{вод}/\sigma_B^{то}$  і  $\psi^{вод}/\psi^{то}$ , які дорівнюють 0,77 і 0,92 відповідно, свідчать про відсутність ознак водневої крихкості металу після тривалого напрацювання в умовах експлуатації.

Результати оцінки ударної в'язкості  $KCV$  основного металу і зварних з'єднань надані у табл. 6. Випробування проводили за температурами –20, 20, 525 та 550 °С з використанням не менше п'яти зразків на кожну температуру. Отримані при цьому дані показали, що основний метал труби в стані напрацювання мав мінімальні значення ударної в'язкості при –20 °С, які становили 36 Дж/см<sup>2</sup> (при середніх значеннях 48,0 Дж/см<sup>2</sup>). За 20 °С мінімальне значення  $KCV$  складало 84 Дж/см<sup>2</sup>; між тим за робочими температурами 525 і 550 °С показники ударної в'язкості знаходилися на достатньо високому рівні 311 і 297 Дж/см<sup>2</sup> відповідно. Слід зазначити, що за вимогами ПНАЭ Г-7-002-86 [13] критеріальні значення ударної в'язкості для матеріалу, границя плинності якого за температури 20 °С має значення до 304 МПа включно, становлять 29 Дж/см<sup>2</sup>, а за вимогами РД 10-577-03 [12] мають бути не менше 25 Дж/см<sup>2</sup>. Метал зварних з'єднань за температури

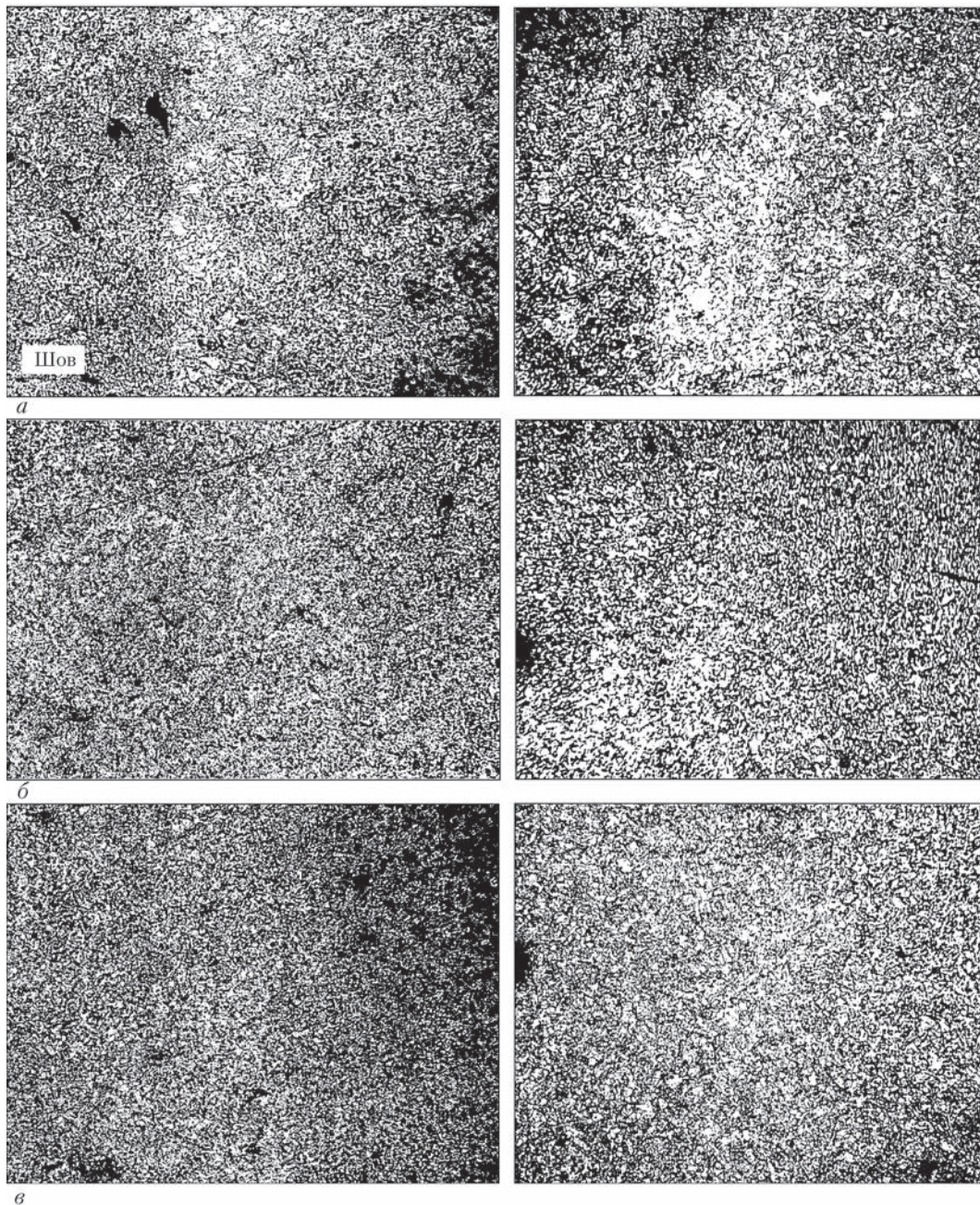


Рис. 9. Порівняльні фрагменти зміни мікроструктури ( $\times 100$ ) ЗТВ зварного шва трубопроводу в стані напрацювання 245800 год і після ВТО: *а* – шов з ділянками неповного розплавлення і перегріву; *б* – ділянка нормалізації; *в* – ділянка неповної перекристалізації,

20 °C показав незадовільні результати: мінімальна величина *KCV*, що дорівнювала 12,8 Дж/см<sup>2</sup>, майже в 2,5 рази нижча за критеріальне значення згідно з НПАОП 0.00-1.59-87 [12] (35 Дж/см<sup>2</sup>). Таку саму мінімальну величину *KCV* отримано і при –20 °C (за вимогами [12] вона має бути не менше 20 Дж/см<sup>2</sup>). Між тим, за температур 525 і 550 °C отримали високі показники ударної в'язкості, які становили 184 і 203 Дж/см<sup>2</sup> відповідно.

Особливий ефект відновлювального термічного оброблення проявився на показниках ударної в'язкості, на що вказує суттєве підвищення *KCV* як основного металу, так і металу шва за температур –20 і 20 °C. Так, мінімальні значення *KCV* ос-

новного металу збільшилися у 6 разів при –20 °C і у 3 рази при 20 °C, а зварного шва – у 4 рази і у 13 разів відповідно. У той же час за робочих температур (525 і 550 °C) показники ударної в'язкості дещо зменшилися в порівнянні з вихідним станом, але в усякому разі вони збереглися на високому рівні.

Результати вимірювання твердості основного металу, металу шва і ділянок зварного з'єднання надані в табл. 7. Твердість *HB* основного металу труби в стані напрацювання становить 132, що в цілому відповідає нормованим значенням для сталі 1X2M1 за нормативним документом [14], ТУ 14-3-517-76 [9] і вимогам [4] для сталі

Таблиця 7. Результати вимірювань твердості зразків труби з напрацюванням 245800 год і після ВТО

Місце вимірів за товщею металу	Напрацювання			Після ВТО		
	Точки	Твердість		Точки	Твердість	
		HRB	HB		HRB	HB
Центр шва	0-1	84,0	156,0	0-1	100,0	229,0
	0-2	82,0	149,0	0-2	101,0	235,0
	0-3	83,5	154,0	0-3	101,0	235,0
	0-4	81,0	146,0	0-4	101,0	235,0
Середнє значення		82,6	151,3		100,8	233,5
Зона сплавлення	5-1	83,0	152,0	5-1	98,0	217,0
	5-2	83,0	152,0	5-2	101,0	235,0
	5-3	96,5	209,0	5-3	101,0	235,0
	5-4	81,0	146,0	5-4	97,4	214,0
Середнє значення		85,9	164,8		99,4	225,3
ЗТВ	6-1	83,0	152,0	7-1	99,0	223,0
	6-2	81,0	146,0	7-2	99,5	237,0
	6-3	82,0	149,0	7-3	100,0	229,0
	6-4	82,0	149,0	7-4	98,0	217,0
Середнє значення		82,0	149,0		99,1	226,5
Основний метал	8-1	76,0	131,0	9-1	99,0	223,0
	8-2	77,5	135,5	9-2	99,4	225,4
	8-3	77,5	135,5	9-3	99,2	224,2
	8-4	74,0	126,0	9-4	98,0	217,0
Середнє значення		76,3	132,0		98,9	222,4

Примітки: 1. За вимогою [14]: для основного металу сталі 1X2M1 допустимі межі твердості HB 161...227, для металу шва і ЗТВ – не більше 240.  
 2. За даними [8] для сталі марки 10CrMo9.10 твердість HB в межах 130...175.  
 3. За вимогами ТУ 14-3-517-76 [9] твердість HB металу труби із сталі 1X2M1 в межах 227...131.

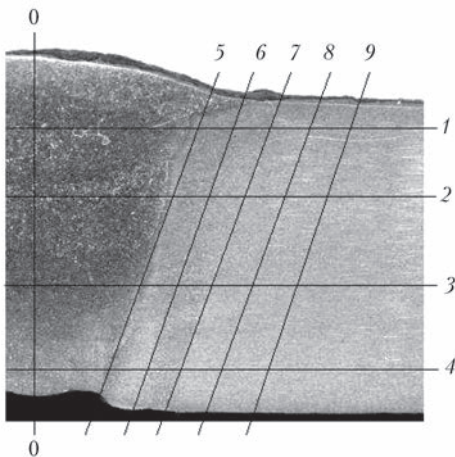


Рис. 10. Схема вимірювання твердості металу

10CrMo9.10. Середні значення твердості металу шва і ЗТВ також знаходяться в межах нормованих. ВТО призвело до підвищення твердості основного металу і металу ЗТВ (в середньому на 70 %), а також металу шва (на 50 %). Таким чином, усі отримані показники твердості знаходяться в межах нормованих стандартами значень, а їх збільшення після ВТО вказують на резерв роботоздатності металу.

**Висновки**

Довготривале напрацювання сталі 10CrMo9.10 (DIN 17176) в конструкції трубопроводів реакторного блоку установок каталітичного риформінгу ЛГ-35-11/300 не призвело до змін структури і деградації механічних властивостей металу за термін служби 204500 і 245800 год в умовах дії водневовміс-

ного середовища високих параметрів. У той же час ініціюються процеси водневої корозії зварних швів, які проявляються у різкому зниженні ударної в'язкості, що призводить до зміщення критичної температури крихкості в область позитивних температур.

Незважаючи на те, що основний метал досліджених трубопроводів задовольняє усім вимогам НД, у зв'язку з підвищенням температури в'язко-крихкого переходу зварних швів за певних умов експлуатації може статися крихке руйнування ділянки трубопроводу. З метою запобігання виробничих інцидентів під час технічних наглядів чи експертних обстежень трубопроводів реакторного блоку установок каталітичного риформінгу ЛГ-35-11/300 гідравлічні чи пневматичні випробування на міцність повинні проводитись за температури не менше 15 °С. В штатних умовах експлуатації (відповідно до регламентних режимів) внаслідок високого рівня в'язких властивостей матеріалу і механічних характеристик небезпека руйнування за робочими температурами (від 525 до 550 °С) відсутня.

**Список літератури**

1. Арчаков Ю. И. (1985) *Водородная коррозия стали*. Москва, Металлургия.
2. Шрейбер Г. К., Перлин С. М., Шебрюев Б. Ф. (1969) *Конструкционные материалы в нефтяной, нефтехимической и газовой промышленности*. Москва, Машиностроение.
3. Средин В. В., Тарасенков П. М. (1963) *Оборудование и трубопроводы установок каталитического риформинга и гидроочистки*. Ленинград, Гостоптехиздат.
4. Антикайн П. А. (1990) *Металлы и расчет на прочность котлов и трубопроводов*. Москва, Энергоатомиздат.
5. (2010) НПАОП 0.00-6.09-10 *Порядок проведения осмотра, випробування та експертного обстеження обладнання*

- установок гідрогенізаційних процесів у нафтопереробному, нафтохімічному і хімічному виробництвах.
6. (2001) ДСТУ 4046-2001 *Обладнання технологічне нафтопереробних, нафтохімічних і хімічних виробництв. Технічне діагностування. Загальні технічні вимоги.*
  7. Ланская К. А. (1980) *Теплоустойчивые стали. Итоги науки и техники. Серия металловедения и термическая обработка.* Москва, ВИНТИ, Т. 14, сс. 54–99.
  8. Wegst C. W. (1995) *Verlag Stahlschlüssel GmbH, Dusseldorf.*
  9. (1976) ТУ 14-3-517-76 *Трубы бесшовные горячекатаные из стали марки 1Х2М1. Технические условия.*
  10. (1975) ГОСТ 9467-75 *Электроды покрытые металлическими для ручной дуговой сварки конструкционных и теплоустойчивых сталей. Типы.*
  11. (2003) РД 10-577-03 *Типовая инструкция по контролю металла и продлению срока службы основных элементов котлов, турбин и трубопроводов тепловых электростанций.*
  12. (1989) НПАОП 0.00-1.59-87 *Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением.* Москва, Недра.
  13. (1989) ПНАЭ Г-7-002-86 *Правила и нормы в атомной энергетике. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок.* Москва, Энергоатомиздат.
  14. (1977) ИТН-77 *Инструкция по техническому надзору, методам ревизии и отбраковке оборудования нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств (нормат. док.).* Волгоград, Волгоградская правда.

References

1. Archakov, Yu.I. (1985) *Hydrogen corrosion of steel.* Moscow, Metallurgiya [in Russian].
2. Shrejber, G.K., Perlin, S.M., Shebryaev, B.F. (1969) *Structural materials in oil, petrochemical and gas industry.* Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
3. Sredin, V.V., Tarasenkov, P.M. (1963) *Equipment and piping of catalytic reforming and hydrofining.* Leningrad, Gostoptekhizdat [in Russian].
4. Antikajin, P.A. (1990) *Metals and strength calculation of boilers and piping.* Moscow, Energoatomizdat [in Russian].
5. (2010) НПАОП 0.00-6.09.10: *Procedure of inspection, testing and expert examination of equipment of hydrogenation process units in oil-refining, petrochemical and chemical industry* [in Ukrainian].
6. (2001) ДСТУ 4046-2001: *Technological equipment of oil-refining, petrochemical and chemical industry. Technical diagnostics. General technical requirements* [in Ukrainian].
7. Lanskaya, K.A. (1980) *Heat-resistant steels. Results of science and technique. Seriya Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka.* Moscow, VINITI, Vol.14, 54-99 [in Russian].
8. Wegst, C.W. (1995) *Verlag Stahlschlüssel GmbH, Dusseldorf.*
9. (1976) ТУ 14-3-517-76: *Seamless hot-rolled pipes from 1Kh2M1 grade steel. Technical requirements* [in Russian].
10. (1975) ГОСТ 9467-75: *Metal coated electrodes for manual arc welding of structural and heat-resistant steels. Types* [in Russian].
11. (2003) РД 10-577-03: *Standard instruction on control of metal and prolongation of service life of main components of boilers, turbines and piping of thermal power stations* [in Russian].

12. (1989) НПАОП 0.00-1.59-87: *Regulations of construction and safety service of pressure vessels.* Moscow, Nedra [in Russian].
13. (1989) ПНАЭ Г-7-002-86: *Regulations and norms in nuclear power plants. Norms of strength calculation of equipment and piping of nuclear power plants.* Moscow, Energoatomizdat [in Russian].
14. (1977) ИТН-77: *Instruction on engineering supervision, methods of inspection examination and decommissioning of equipment of oil-refining and petrochemical industry* (stand. doc.). Volgograd, Volgogradskaya Pravda [in Russian].

КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ В ВОДОРОДОСОДЕРЖАЩЕЙ РАБОЧЕЙ СРЕДЕ

С. З. СТАСЮК

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко  
НАН Украины. 01014, г. Киев, ул. Тимирязевская, 2.  
E-mail: stasiuk-ipp@list.ru

Рассмотрены методические подходы к экспертной оценке технического состояния технологических трубопроводов, транспортирующих горючие пожароопасные среды, содержащие от 60 до 90 % об. водорода в смеси с жидкими или парообразными углеводами, сероводородом и другими компонентами. Библиогр. 14, табл. 7, рис. 10.

Ключевые слова: технологические трубопроводы, каталитический риформинг, водородная коррозия, металлографические исследования, механические испытания, механические свойства, ресурс безопасной эксплуатации

MONITORING THE TECHNICAL CONDITION OF PROCESS PIPING AT LONG-TERM OPERATION IN HYDROGEN-CONTAINING WORKING MEDIUM

S. Z. STASYUK

G. S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the NAS of Ukraine, 2 Timiryazevskaya str., 01014, Kyiv, Ukraine  
E-mail: stasiuk-ipp@list.ru

The paper deals with procedural approaches to expert evaluation of the technical condition of process piping, transporting flammable and explosive media that contain from 60 up to 90 vol. % hydrogen in a mixture with liquid or vaporous carbohydrates, hydrogen sulphide and other components. 14 References, 7 Tables, 9 Figures.

Keywords: process piping, catalytic reforming, hydrogen corrosion, mechanical testing, mechanical properties, safe service life

Надійшла до редакції  
23.02.2018



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



IX Международная конференция  
«Математическое моделирование и информационные технологии  
в сварке и родственных процессах»

Посвящается 100-летию Национальной академии наук Украины  
Одесса, Украина, Аркадия, отель «Курортный»

10–14 сентября 2018

<http://pwi-scientists.com/rus/mmi2018>

## ВПЛИВ МЕХАНІЧНИХ НАПРУЖЕНЬ НА СИГНАЛ ВИХРОСТРУМОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА МАГНІТНОЇ АНІЗОТРОПІЇ

В. М. УЧАНІН<sup>1</sup>, С. М. МІНАКОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України. 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5.

E-mail: [uchanin@ipm.lviv.ua](mailto:uchanin@ipm.lviv.ua)

<sup>2</sup>НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, пр-т Перемоги, 37

Представлено результати дослідження розробленого вихрострумowego перетворювача магнітної анізотропії з робочим діаметром 17 мм. Показано чутливість перетворювача до напружень розтягу і стиску у феромагнітних сталях. Зокрема, показано характер годографів сигналів на робочих частотах 5,0; 20,0 і 50,0 кГц від напружень розтягу і стиску, створених під час реалізації циклу «навантаження–розвантаження» по схемі чотириточкового згину. Показано протилежний напрямок годографів для напружень розтягу і стиску від точки балансування, що дозволяє визначити характер напружень за напрямком годографу у комплексній площині або по знаку вихідного сигналу після амплітудно-фазового перетворення. Досліджено зміни амплітуди сигналу вихрострумowego перетворювача під час реалізації циклу навантаження–розвантаження. Показано існування магнітопружного гістерезису для обох видів напружень. Бібліогр. 24, рис. 4

*Ключові слова:* механічні напруження розтягу і стиску, магнітна анізотропія, вихрострумований перетворювач, годограф, магнітопружний гістерезис

**Стан проблеми.** Оцінювання технічного стану і прогнозування довговічності конструкцій неможливі без інформації про їх напружений стан. Особливої уваги слід приділяти критичним елементам конструкцій, де робочі напруження можуть додаватися до залишкових напружень. Зокрема це стосується зварних конструкцій через характерні залишкові напруження, викликані усадкою металу і фазовими змінами під час формування зварного шва [1–3].

Існуючі методи вимірювання напружень в елементах конструкцій можна поділити на руйнівні і неруйнівні [4]. До найбільш популярних для визначення залишкових напружень відносяться механічні методи, побудовані на вимірюваннях деформацій під час відокремлення певної частки матеріалу конструкції. В якості прикладу можна назвати метод отвору з тензометричними вимірюваннями поверхневих деформацій [5]. Загалом, крім цього, відомо багато інших фізичних методів, серед яких на практиці найчастіше використовують рентгенівський, ультразвуковий, тензометричний, оптичні (голографічний і метод електронної спекл-інтерферометрії) і магнітні методи [4, 6–10]. Кожний з цих методів має свої переваги і обмеження, через що формуються відповідні сфери їх застосування.

Значного поширення для визначення напруженого стану набули магнітні методи, побудовані на властивості феромагнітних матеріалів змінювати магнітний стан під впливом механічних напружень, що обумовлено перебудовою магнітних

доменів [7]. Ця магнітомеханічна взаємодія обумовлена дією зворотного магнітострикційного ефекту (ефект Віллари). Більшість магнітних методів побудовано на залежності різних параметрів петлі гістерезису або параметрів шумів Баркгаузена від напружень [7–11]. В той же час встановити однозначну функціональну залежність між цими параметрами і напружено-деформованим і структурним станом поки не вдається, незважаючи на незаперечні успіхи у застосуванні цих методів.

Довгу історію розвитку мають магнітопружний і магнітоанізотропний способи визначення напруженого стану, які також використовують зворотний магнітострикційний ефект [12–20]. Магнітоанізотропний метод побудований на визначенні зміни анізотропії магнітних властивостей контрольованого матеріалу, що виникають під дією робочих і залишкових напружень. Тобто йдеться про складову магнітної анізотропії, яка обумовлена напруженнями, на відміну від її кристалографічної і текстурної складових [21]. В англійській літературі цю особливість іноді підкреслюють вдалим терміном «Stress induced magnetic anisotropy method». Використання магнітоанізотропних перетворювачів дозволяє зменшити вплив низки факторів, пов'язаних з впливом температури, зовнішніх магнітних полів, змін зазору між перетворювачем і контрольованою поверхнею тощо. Крім того, нами показано інваріантні властивості магнітоанізотропного методу щодо структурного стану матеріалу, що вигідно відрізняє його від інших магнітних методів і створює передумови для побудови способів роздільного визначення структурного і напруженого стану

матеріалу на основі використання одночасно двох магнітних методів [20, 22].

Магнітоанізотропний спосіб контролю традиційно відносять до магнітних способів можливо через те, що він базується на змінах магнітної проникності. Але у цій роботі будемо дотримуватися альтернативної думки і вважати його варіантом вихрострумowego методу, зважаючи на використання (у нашому випадку) змінного електромагнітного поля. Можливим компромісом тут може бути усвідомлення певного дуалізму цього методу, коли за характером первинного електромагнітного поля метод є типово вихрострумowym, а за параметром досліджуваного матеріалу, який впливає на сигнал, – магнітним. Повернення магнітоанізотропного способу вимірювання напружень в «лоно» вихрострумowego методу [20] дозволяє застосувати традиційні для цього методу підходи, зокрема пов'язані з презентацією сигналу первинного перетворювача, що буде реалізовано в даній роботі.

**Методика досліджень.** Конструкція вихрострумowego перетворювача магнітної анізотропії (ВСПМА) дозволяла визначити різницю між значеннями вторинного електромагнітного поля вихрових струмів в двох точках, де їх напрямки (і відповідно напрямки первинного електромагнітного поля) є ортогональними [23]. Це можливо виконати, коли обмотки збудження і вимірювання розміщені анаксіально. Вторинне електромагнітне поле в кожній точці буде залежати від складових магнітної проникності для відповідних ортогональних напрямків первинного поля, які в свою чергу залежать від прикладених чи залишкових напружень. В конструкції використовували дві генераторні і дві вимірювальні обмотки, розміщені на феритових осердях діаметром 4,3 мм. Робочий діаметр ВСПМА 17 мм. Вихідні сигнали ВСПМА реєстрували стандартним універсальним вихрострумowym дефектоскопом типу ВД 3-81 [24]. Зміни сигналу ВСПМА реєстрували у комплекс-

ній площині дефектоскопа на робочих частотах 5,0; 20,0 і 50,0 кГц під час навантажень розтягу і стиску. Крім цього, в режимі вимірювання реєстрували зміни амплітуди сигналів під час навантажень розтягу і стиску на робочих частотах 5,0 і 10,0 кГц.

Експериментальна установка з встановленим на зразку ВСПМА і вихрострумowym дефектоскопом подана на рис. 1, а. Установка працює по схемі чистого згину, що забезпечується чотириточковим навантаженням силами  $P$  (рис. 1, б). Перевагою такого навантаження є можливість формування напружень двох типів (стиску і розтягу) на різних сторонах зразка. Із розподілу моментів  $M$  згину по довжині зразка (рис. 1, б) видно, що в центральній зоні зразка між точками прикладання сили  $P$  формується однорідний розподіл напружень (поперечна сила на цій ділянці також відсутня). Це важливо, так як сигнал ВСПМА не буде залежати від його положення на зразку у цих межах. Прикладені сили можна змінювати вручну шляхом гвинтового опускання важеля (на рис. 1, а) важіль показано зверху, а гвинт важеля праворуч). Для визначення напружень здійснювали вимірювання прогину у середині зразка за допомогою індикатора «годинникового типу» (див. рис. 1, а) із ціною поділки 0,01 мм, який попередньо був прокалібрований за допомогою динамометра.

Досліджували зразки із сталі 09Г2С із перерізом  $8 \times 60$  мм та довжиною 450 мм. Під час встановлення ВСПМА на зразок за умови нульових напружень на виході буде спостерігатися сигнал, пов'язаний з текстурною складовою магнітної анізотропії матеріалу і не ідеально однаковою чутливістю зондів вимірювання електромагнітного вторинного поля. Пов'язана з цими факторами похибка має адитивний характер і може бути компенсована стандартною для вихрострумowych дефектоскопів процедурою компенсації небалансу. Для цього дефектоскоп має функцію векторної

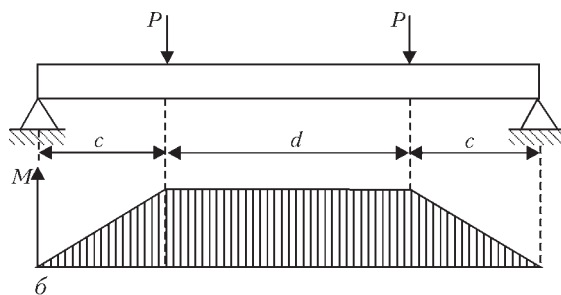


Рис. 1. Експериментальна установка для чотириточкового навантаження з вихрострумowym дефектоскопом типу ВД 3-81 (а) по схемі чистого згину (б):  $c = 100$ ;  $d = 200$  мм

компенсації небалансу ВСПМА в автоматичному режимі (операція балансування). Очевидно, що традиційна для вихрострумових дефектоскопів векторна компенсація забезпечує вищу точність вимірювання порівняно з компенсацією постійної напруги небалансу після фазочутливого детектора, яка застосована у більшості відомих приладів для визначення напружень магнітоанізотропним способом. Операцію компенсації небалансу здійснювали під час встановлення ВСПМА на зразок у розвантаженому стані перед проведенням навантаження. Таким чином, амплітуда сигналу ВСПМА  $U_{\sigma}$  під час навантаження обумовлена тільки наведеними напруженнями змінами магнітної анізотропії матеріалу зразка.

**Результати досліджень.** Годографи сигналів ВСПМА, які характеризують зміни сигналу в комплексній площині на робочих частотах 5,0; 20,0 і 50,0 кГц під час реалізації циклу навантаження-розвантаження зі створенням напружень розтягу і стиску від 0 до 225 МПа, подано на рис. 2. Попередньо напрямком годографів відносно нульової точки після балансування (на рис. 2 помічено цифрою 1) під час навантаження розтягу був зорієнтований вгору (приблизно вертикально) вибором відповідного повороту комплексної площини дефектоскопу. Чутливість вибиралась такою, щоб відповідний годограф при навантаженні розтягу до максимального рівня не виходив за межі екрану дефектоскопу.

З ростом напружень розтягу амплітуда сигналу зростає і точка, що відповідає кінцю вектора вимірюваного сигналу ВСПМА, відхиляється від нульової точки вертикально вгору відповідно до

попередньо вибраного повороту комплексної площини. Під час розвантаження зразка ця точка пересувається у зворотному напрямку, тобто відповідні годографи сигналів ВСПМА під час навантаження і розвантаження зразка на рис. 2 збігаються.

Зі зростанням напружень стиску амплітуда сигналу також зростає, але відповідна точка годографу відхиляється від нульової точки у протилежному напрямку, тобто приблизно вертикально вниз.

За малих навантажень годографи змін сигналів близькі до лінійних, тобто фазовий кут сигналів практично не змінюється. І тільки, коли напруження досягають певного рівня можна спостерігати незначні зміни фазового кута сигналу і, відповідно, незначну нелінійність годографів.

За напрямком годографів сигналу ВСПМА можна визначати характер напружень (розтягу або стиску), але за умови, що відповідна операція балансування ВСПМА виконана під час його встановлення на повністю розвантаженому зразку. Якщо балансування ВСПМА буде здійснено на зразку з певним рівнем напружень, цей рівень напружень буде умовно вважатися нульовим і відповідна точка буде встановлена в центр комплексної площини.

Зміни амплітуди сигналу залежно від рівня напружень розтягу в діапазоні від 0 до 225 МПа під час реалізації циклу навантаження-розвантаження подано на рис. 3. Відповідні зміни амплітуди сигналу залежно від рівня напружень стиску в тому ж діапазоні напружень подано на рис. 4.

Отримані залежності змін амплітуди сигналу ВСП для циклів навантаження-розвантаження розтягу (рис. 3) і стиску (рис. 4) демонструють високу чутливість розроблених ВСПМА до різних видів на-

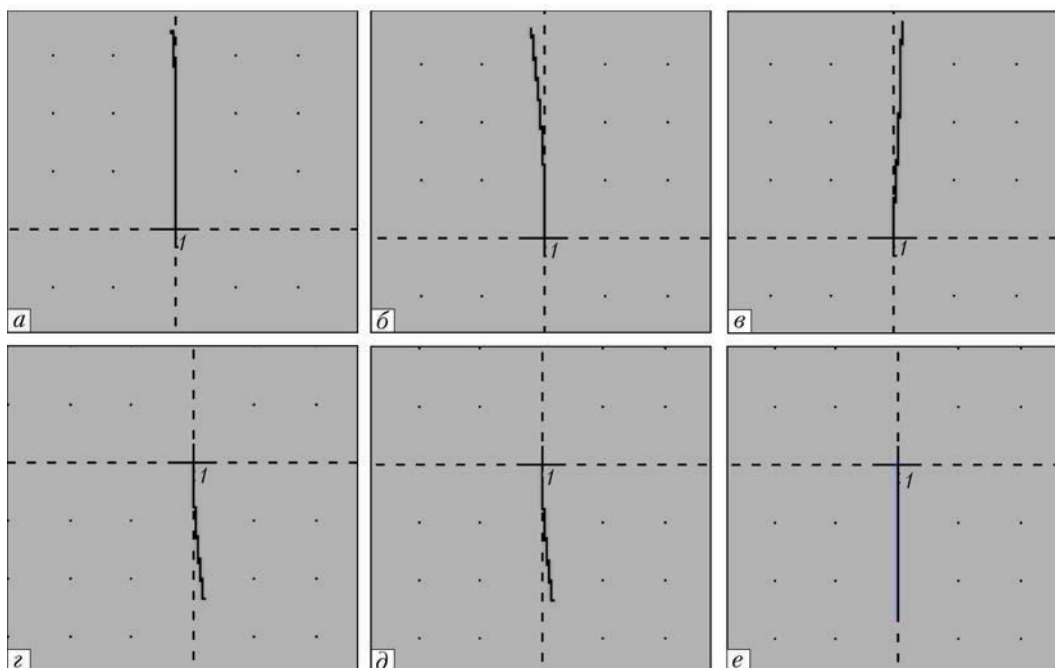


Рис. 2. Годографи сигналів ВСПМА під час зміни напружень розтягу (а-в) і стиску (z-е) на робочих частотах 5,0 (а, z); 20,0 (б, д) і 50,0 кГц (в, е)

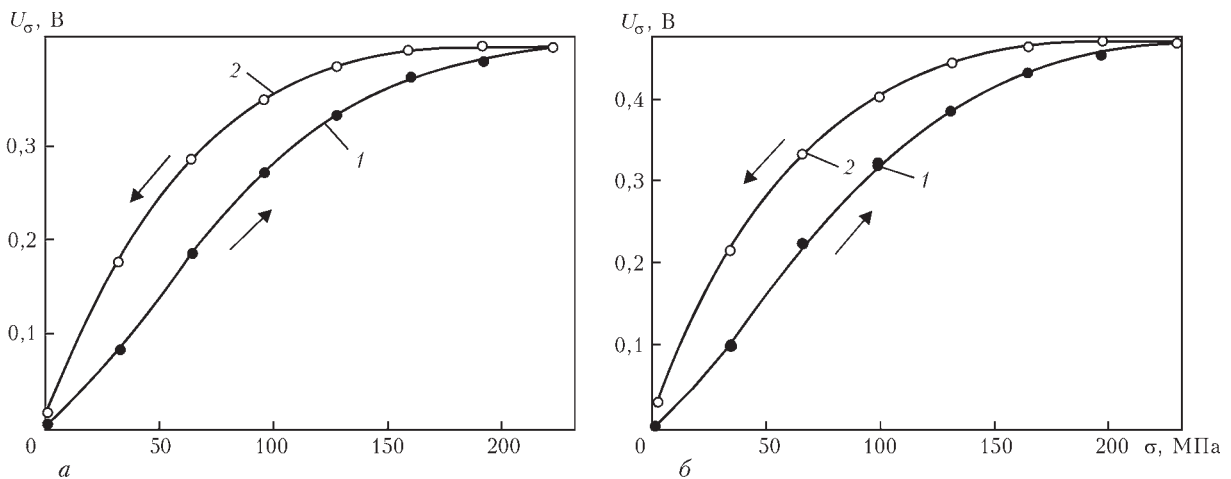


Рис. 3. Залежність амплітуди сигналу ВСПМА від рівня навантаження розтягу (1) з наступним розвантаженням (2) на робочих частотах 5,0 (а) і 10,0 кГц (б)

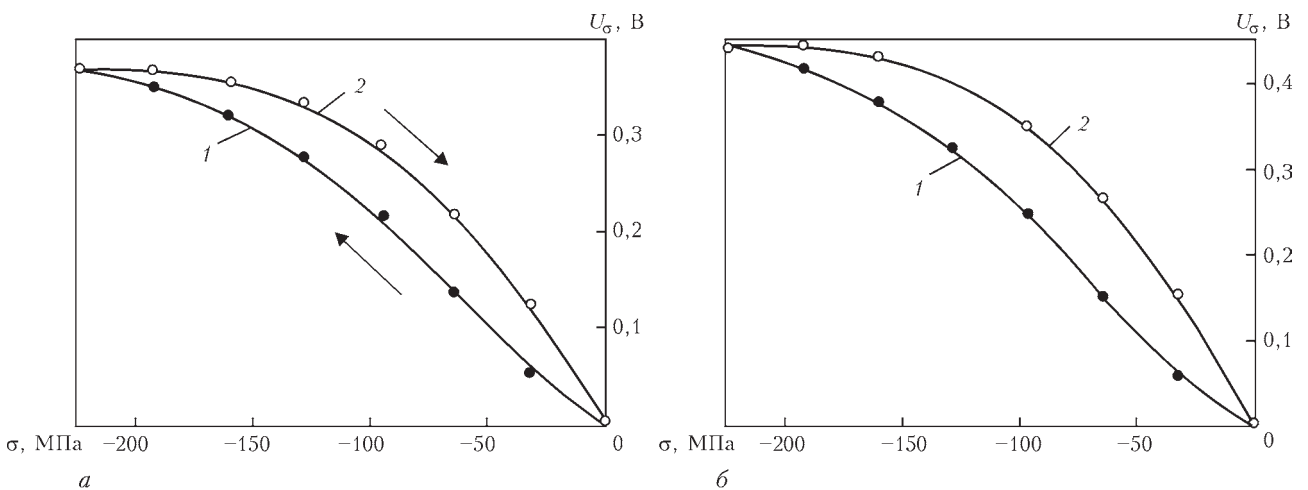


Рис. 4. Залежності амплітуди сигналу ВСПМА від рівня навантаження стиску (1) з наступним розвантаженням (2) на робочих частотах 5,0 (а) і 10,0 кГц (б)

пружень, а також існування суттєвого ефекту магнітопружного гістерезису для обох випадків.

Магнітопружний гістерезис можна вважати наслідком двох процесів: механічного гістерезису, викликаного наявністю залишкових деформацій, що виникають при як завгодно малих механічних напруженнях (пружна післядія), і магнітного гістерезису, викликаного специфікою процесів намагнічування. Очевидно, що магнітопружний гістерезис може бути джерелом відповідної похибки під час визначення абсолютного значення механічних напружень. Але слід зазначити, що магнітопружний гістерезис має місце в інших магнітних методах визначення напружень, зокрема побудованих на визначенні коерцитивної сили, що не заважає успішно використовувати його для оцінювання напружено-деформованого стану конструкцій із феромагнітних матеріалів. В багатьох випадках для оцінювання небезпечно критичного стану контрольованого матеріалу важливо визначити не стільки абсолютні значення напружень, скільки порівняти напруження в різних зонах для оцінювання розбалансувань в умовах дії робочих навантажень, а також визначити локальні

зони концентрації напружень і характер їх розподілу. Крім того, зазначимо, що під час виконання повторних циклів навантаження–розвантаження магнітопружний гістерезис зменшується, що буде досліджено і подано в наших наступних роботах. Сказане не зменшує важливості пошуку підходів, які би призвели до зменшення впливу магнітопружного гістерезису, що також буде предметом наших подальших досліджень.

### Висновки

1. Коротко представлено магнітні методи визначення напруженого стану конструкцій із феромагнітних матеріалів.

2. Представлено розроблений ВСПМА з робочим діаметром 17 мм. Показано чутливість запропонованого ВСПМА до напружень у феромагнітних сталях. Зокрема, показано характер годографів сигналів ВСПМА на робочих частотах 5,0; 20,0 і 50,0 кГц від напружень розтягу і стиску, створених під час реалізації циклу навантаження–розвантаження по схемі чотириточкового згину. Показано протилежний напрямок годографів для напружень розтягу і стиску від точки балансуван-



ня, що дозволяє визначити характер напружень за напрямком годографу у комплексній площині або по знаку вихідного сигналу після амплітудно-фазового перетворення.

3. Досліджено зміни амплітуди сигналу ВСПМА під час реалізації циклу навантаження–розвантаження. Показано існування магнітопружного гістерезису для обох видів напружень.

**Список літератури**

1. Nitschke-Pagel T., Wohlfahrt H. (2002) Residual Stresses in Welded Joints – Sources and Consequences. *Mat. Sci. Forum*, 404-407, P. 215–226.
2. Винокуров В. А., Григорьянц А. Г. (1984) *Теория сварочных деформаций и напряжений*. Москва, Машиностроение.
3. Лобанов Л. М., Позняков В. Д., Пивторак В. А. та ін. (2009) Залишкові напруження у зварних з'єднаннях високоміцних сталей. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, **6**, 13–22.
4. Rossini N. S., Dassisti M., Benyounis K. Y., Olabi A. G. (2012) Method of measuring residual stresses in components. *Materials and Design*, **35**, 572–598.
5. ASTM Standard E 837–08. (2008) *Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole–Drilling Strain-Gage Method*. USA, Philadelphia.
6. Лобанов Л. М., Пивторак В. А., Савицкий В. В., Ткачук Г. И. (2006) Методика определения остаточных напряжений в сварных соединениях и элементах конструкций с использованием электронной спекл-интерферометрии. *Автоматическая сварка*, **1**, 25–30.
7. Bulte D. P., Langman R. A. (2002) Origins of magnetomechanical effect. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **251**, 229–243.
8. Осташ О., Вольдмаров О., Учанін В., Безлюдько Г. (2004) Діагностика напружено-деформованого стану та накопичення пошкоджуваності в елементах сталевих конструкцій магнітним методом. *Праці міжнар. конф. «Механіка руйнування і міцність конструкцій»*. Львів, ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАНУ, сс. 749–753.
9. Завальнюк О. П., Учанін В. М. (2013) Моніторинг напружено-деформованого стану несучих елементів суднових конструкцій. *Відбір і обробка інформації*, **38** (114), 13–16.
10. Stuecker E., Hofer G., Koch D., Guenes U. (1988) *Method and apparatus for measuring and precisely locating internal tensile stresses in hardened regions of components by measuring coercive field strength and Barkhausen noise amplitude*. appl. USA, Pat. 4881030, G01B7/24, G01N27/72. 182845, filed 18.04.1988, publ. 14.11.1989.
11. Gur H., Erlan G., Bateglin C. (2016) Investigating the Effect of Subsequent Weld Passes on Surface Residual Stresses in Steel Weldments by Magnetic Barkhausen Noise Technique. *Materials Evaluation*, **3**, 408–423.
12. Мехонцев Ю. Я. (1966) О магнитных способах оценки внутренних напряжений. *Дефектоскопия*, **2**, 94–95.
13. Орехов Г. Т. (1974) Определение остаточных сварочных напряжений магнитоупругим методом. *Автоматическая сварка*, **4**, 30–32.
14. Abuku S. (1977) Magnetic Studies of Residual Stress in Iron and Steel Induced by Uniaxial Deformation. *Japanese Journal of Applied Physics*, **16**, **7**, 1161–1170.
15. Yamada H., Uchiyama S., Takeuchi et al. (1987) Noncontact Measurement of Bending Stress Using a Magnetic Anisotropy Sensor. *IEEE Transactions on Magnetics*, **23**, **5**, 2422–2424.
16. Минаков С. Н., Юрченко В. А., Аносов А. П. (1992) *Способ определения интенсивности напряжений в изделиях из ферромагнитных материалов*. СССР, А. с. 1763909 МКІ G01I/12. Опубл. 23.09.92.
17. Фомичев С. К., Минаков С. Н., Михалко С. В. и др. (2009) Определение силовых воздействий на трубопровод по анализу эппор распределения продольных напряжений. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **2**, 11–14.
18. Жуков С. В., Жуков В. С., Копица Н. Н. (2002) *Способ определения механических напряжений и устройство для его осуществления*. Россия, Пат. 2195636. Опубл. 27.12.02.

19. Lo C. C. H. (2011) Characterization of Residual Stresses in Ferrous Components by Magnetic Anisotropy Measurements Using a Hall Effect Sensor Array Probe. Review of Progress in *Quantitative Nondestructive Evaluation* (Thompson D.O., Ed.), **30**, 1249–1255.
20. Uchanin V., Minakov S., Nardoni G. et al. (2017) Eddy current method for evaluation of stresses in steel components. *Proceeding of 14<sup>th</sup> Intern. Conf. «Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering»*, September 4–6, 2017, Bernardin, Slovenia, pp. 207–212.
21. Tumanski S. (2011) *Handbook of Magnetic Measurements*. Boca Raton Florida, CRC Press.
22. Учанін В. М., Минаков С. М., Осташ О. П. и др. (2015) *Способ комплексного электромагнитного контролю структурного и напружено-деформованого стану ферромагнітних матеріалів*. Украина, Пат. 100379, МПК G01L1/12, G01N27/72.
23. Учанін В. М. (2013) *Вихрострумові накладні перетворювачі подвійного диференціювання*. Львів, Сполом.
24. Uchanin V., Lutsenko G., Oranasenko A., Dzhaganian A. (2016) PROMPRYLAD Family of Eddy Current Flaw Detectors – From Simple to more Complicated. *19<sup>th</sup> World Conf. on NDT, 2016, Munich*.

**References**

1. Nitschke-Pagel, T., Wohlfahrt, H. (2002) Residual stresses in welded joints – sources and consequences. *Mat. Sci. Forum*, 404-407, 215-226.
2. Vinokurov, V.A., Grigoryants, A.G. (1984) *Theory of welding strains and stresses*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
3. Lobanov, L.M., Poznyakov, V.D., Pivtorak, V.A. et al. (2009) Residual stresses in welded joints of high-strength steels. *Fiz.-Khimich. Mekhanika Materialiv*, **6**, 13-22 [in Ukrainian].
4. Rossini, N.S., Dassisti, M., Benyounis, K.Y., Olabi, A.G. (2012) Method of measuring residual stresses in components. *Materials and Design*, **35**, 572-598.
5. (2008) ASTM Standard E 837-08: *Standard test method for determining residual stresses by the hole-drilling strain-gage method*. USA, Philadelphia.
6. Lobanov, L.M., Pivtorak, V.A., Savitsky, V.V., Tkachuk, G.I. (2006) Procedure for determination of residual stresses in welded joints and structural elements using electron speckle-interferometry. *The Paton Welding J.*, **1**, 24-29.
7. Bulte, D.P., Langman, R.A. (2002) Origins of magnetomechanical effect. *J. of Magnetism and Magnetic Materials*, **251**, 229-243.
8. Ostash, O., Voldmarov, O., Uchanin, V., Bezlyudko, G. (2004) Diagnostics of stress-strain state and damage accumulation in steel structure components by magnetic method. *In: Proc. of Int. Conf. on Fracture Mechanics and Strength of Structures*. Lviv, PMI, 749-753.
9. Zavalnyuk, O.P., Uchanin, V.M. (2013) Monitoring of stress-strain state of load-carrying elements of ship structures. *Vidbir i Obrobka Informatsii*, **38**(114), 13-16 [in Ukrainian].
10. Stuecker, E., Hofer, G., Koch, D., Guenes, U. (1988) *Method and apparatus for measuring and precisely locating internal tensile stresses in hardened regions of components by measuring coercive field strength and Barkhausen noise amplitude*. Appl. USA, Pat. 4881030, Int. Cl. G01B7/24, G01N27/72. 182845. Fil. 18.04.1988; publ. 14.11.1989.
11. Gur, H., Erlan, G., Bateglin, C. (2016) Investigating the effect of subsequent weld passes on surface residual stresses in steel weldments by magnetic Barkhausen noise technique. *Materials Evaluation*, **3**, 408-423.
12. Mekhontsev, Yu.Ya. (1966) On magnetic methods of evaluation of internal stresses. *Defektoskopiya*, **2**, 94-95 [in Russian].
13. Orekhov, G.T. (1974) Determination of residual welding stresses by magneto-elastic method. *Avtomatich. Svarka*, **4**, 30-32 [in Russian].
14. Abuku, S. (1977) Magnetic studies of residual stress in Iron and steel induced by uniaxial deformation. *Jap. J. Appl. Phys.*, **16**(7), 1161-1170.
15. Yamada, H., Uchiyama, S., Takeuchi, et al. (1987) Noncontact measurement of bending stress using a magnetic anisotropy sensor. *IEEE Transact. on Magnetics*, **23**(5), 2422-2424.

16. Minakov, S.N., Yurchenko, V.A., Anosov, A.P. (1992) *Method for determination of stress intensity in products of ferromagnetic materials*. USSR author's cert., Int. Cl. G011/12. Publ. 23.09.92 [in Russian].
17. Fomichev, S.K., Minakov, S.N., Mikhalko, S.V. et al. (2009) Determination of force impacts on a pipeline by analysis of longitudinal stress distribution epures. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **2**, 11-14 [in Russian].
18. Zhukov, S.V., Zhukov, V.S., Kopitsa, N.N. (2002) *Method of determination of mechanical stresses and device for its realization*. Pat. 2195636 RF, publ. 27.12.02 [in Russian].
19. Lo, C.C.H. (2011) Characterization of residual stresses in ferrous components by magnetic anisotropy measurements using a Hall effect sensor array probe. Ed. by D.O. Thompson. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, **30**, 1249-1255.
20. Uchanin, V., Minakov, S., Nardoni, G. et al. (2017) Eddy current method for evaluation of stresses in steel components. In: *Proc. of 14th Intern. Conf. on Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering* (September 4-6, 2017, Bernardin, Slovenia), 207-212.
21. Tumanski, S. (2011) *Handbook of magnetic measurements*. Boca Raton Florida, CRS Press.
22. Uchanin, V.M., Minakov, S.M., Ostash, O.P. et al. (2015) *Method of complex electromagnetic control of structural and strain-stress state of ferromagnetic materials*. Pat. 100379 Ukraine, Int. Cl. G01L1/12, G01N27/72 [in Ukrainian].
23. Uchanin, V.M. (2013) *Eddy current put-on transducers of double differentiation*. Lviv, Spolom [in Ukrainian].
24. Uchanin, V., Lutsenko, G., Opanasenko, A., Dzhaganian, A. (2016) PROMPRYLAD Family of eddy current flaw detectors – from simple to more complicated. In: *Proc. of 19th World Conf. on NDT, 2016, Munich*.

ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА СИГНАЛ ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ МАГНИТНОЙ АНИЗОТРОПИИ

V. M. UCHANIN<sup>1</sup>, S. M. MINAKOV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко  
НАН Украины. 79060, г. Львов, ул. Научная, 5.  
E-mail: uchanin@ipm.lviv.ua

<sup>2</sup>НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского». 03056, г. Киев,  
пр-т Победы, 37

Представлены результаты исследования разработанного вихретокового преобразователя магнитной анизотропии с рабочим диаметром 17 мм. Показана чувствительность преобразователя к напряжениям растяжения и сжатия в ферромагнитных сталях. В частности, показан характер годографов сигналов на рабочих частотах 5,0; 20,0 и 50,0 кГц от напряжений растяжения и сжатия, созданных при реализации цикла «нагруз-

ка-разгрузка» по схеме четырехточечного изгиба. Показано противоположное направление годографов для напряжений растяжения и сжатия от точки балансировки, что позволяет определить характер напряжений по направлению годографа в комплексной плоскости или по знаку исходящего сигнала после амплитудно-фазового превращения. Исследованы изменения амплитуды сигнала вихретокового преобразователя при реализации цикла нагрузка-разгрузка. Показано существование магнитоупругого гистерезиса для обоих видов напряжений. Библиогр. 24, рис. 4.

Ключевые слова: механические напряжения растяжения и сжатия, магнитная анизотропия, вихретоковый преобразователь, годограф, магнитоупругий гистерезис

INFLUENCE OF MECHANICAL STRESSES ON THE SIGNAL OF EDDY CURRENT TRANSDUCER OF MAGNETIC ANISOTROPY

V. M. UCHANIN<sup>1</sup>, S. M. MINAKOV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>G. V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of  
Ukraine, 5 Naukova str, 79060, Lviv.  
E-mail: uchanin@ipm.lviv.ua

<sup>2</sup>NTUU «Igor Sikorskii KPI», 17 Peremogy ave., 03056, Kyiv,  
Ukraine

The paper gives the results of studying the developed eddy current transducer of magnetic anisotropy with working diameter of 17 mm. Transducer sensitivity to tensile and compressive stresses in ferromagnetic steels is shown. In particular, shown is the shape of signal travel time curves at working frequencies of 5.0; 20.0; and 50.0 kHz, due to tensile and compressive stresses, induced during realization of loading-unloading cycle by four-point bend schematic. Opposite direction of travel time curves for tensile and compressive stresses from the balancing point is demonstrated that allows determination of the nature of stresses in the direction of travel time curves in a complex plane, or by the output signal sign after amplitude-phase transformation. Changes in the amplitude of eddy current transducer signal during realization of loading-unloading cycle were studied. Existence of magneto-elastic hysteresis for both the kinds of loading is shown. 24 Reference, 4 Figures.

Keywords: mechanical tensile and compressive stresses, magnetic anisotropy, eddy current sensor, travel time curves, magnetoelastic hysteresis

Надійшла до редакції  
19.02.2018

**1-я МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
ПО СВАРКЕ И НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ 2018  
1st ICWNDT-2018**

22–24 октября 2018 г.

г. Афины, Греция

Адрес: WGI: Trapezountos & Digeni Akrita, Elefsina 192 00, Attikis, Greece.

Phone (+30) 210 3630050, Fax (+30) 2103636917,

Website: www.wgi.gr, E-mail: tzaferis@wgi.gr

# ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ЭКСПЕРТИЗЫ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ДЕФЕКТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

А. С. МИЛЕНИН<sup>1</sup>, Е. А. ВЕЛИКОИВАНЕНКО<sup>1</sup>, Г. Ф. РОЗЫНКА<sup>1</sup>, Н. И. ПИВТОРАК<sup>1</sup>,  
А. Н. ХИМИЧ<sup>2</sup>, В. А. СИДОРУК<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>Институт кибернетики им. В. М. Глушкова НАН Украины. 03187, г. Киев, просп. Академика Глушкова, 40.

E-mail: incyb@incyb.kiev.ua

Применительно к характерным задачам экспертизы работоспособности трубопроводных элементов с обнаруженными дефектами локальной коррозионно-эрозионной потери металла разработан комплекс моделей для оценки предельного состояния в условиях сложного температурно-силового эксплуатационного воздействия методом численного прогнозирования многомерного напряженно-деформированного состояния, докритического и критического повреждения материала конструкции с учетом различных механизмов деформирования при внешнем нагружении. Для программной реализации моделей было использовано конечно-элементное решение совместных задач кинетики состояния конкретного дефектного трубопровода посредством новых высокопроизводительных методов параллельного вычисления на основе многопроцессорных и гибридных компьютерных технологий. На примерах эксплуатационной поврежденности трубопроводных элементов магистральных и технологических систем исследованы особенности влияния локальных поверхностных потерь металла на развитие их докритической поврежденности, предельного состояния и работоспособности. Показано влияние дефекта локального утонения стенки различного размера на степень снижения статической прочности элемента магистрального трубопровода под действием внутреннего давления, а также дополнительного внешнего изгибающего момента. Также показано, что на эффективность конкретного алгоритма численных расчетов значительное влияние оказывает структура определяющей матрицы системы линейных уравнений. Библиогр. 10, табл. 1, рис. 5.

*Ключевые слова:* трубопроводный элемент, дефект несплошности металла, предельное состояние, работоспособность, численное прогнозирование, высокопроизводительные программные средства

Прогнозирование работоспособности ответственных конструктивных элементов, деталей машин и механизмов, в том числе оценка их фактического состояния, включает в себя комплекс технологических и аналитических процедур, таких как дефектоскопия, определение фактических свойств материала, прогнозирование напряженно-деформированного состояния, остаточного ресурса и проч. Часть такого экспертного анализа предполагает проведение численных исследований, направленных на минимально консервативное определение предельного состояния конструкции, для чего используются различные аналитические или численные подходы [1, 2]. Минимизация консервативности такого рода процедур возможна, в частности, с использованием современных средств компьютерного моделирования кинетики многомерных физических процессов, происходящих при производстве, монтаже, ремонте и эксплуатации рассматриваемой конструкции (детали), что позволяет с высокой степенью достоверности прогнозировать развитие докритического и критического повреждения ее материала, а также предельное состояние и работоспособ-

ность. Но для эффективного использования таких подходов, с одной стороны, необходимо построение достаточно сложных физических и математических моделей взаимосвязанных процессов и формальных критериев, адекватно описывающих развитие состояния конструкций при внешнем эксплуатационном воздействии. С другой стороны требуется реализация достаточно эффективных программных средств, позволяющих оперативно производить соответствующую обработку массивов данных инструментального контроля, численное прогнозирование и выполнение (или невыполнение) необходимых требований по остаточному ресурсу.

При проведении численных экспериментов в таких постановках, особенно, если речь идет о расчетах больших элементов конструкций (в том числе в реальном времени), требуется мелкая пространственная и временная детализация математических моделей. В результате этого формулируются расчетные задачи сверхбольшой размерности или с большим объемом данных, что предполагает высокие требования к вычислительным ресурсам компьютерной техники. Еще одним

фактором, также ресурсоемким, является обеспечение достоверности полученных численных решений, которая определяется как размерностью дискретных моделей, так и погрешностями исходных данных. Рассмотрение проблем математического моделирования в такой постановке из-за нехватки вычислительных ресурсов современных персональных компьютеров и рабочих станций требует перехода к новейшим компьютерным технологиям, то есть к использованию программно-технических комплексов с параллельной организацией вычислений. Дополнительной мотивацией создания прикладного программного обеспечения нового поколения является мировая тенденция к непрерывному развитию новых архитектур компьютеров, технических средств, системного программного обеспечения.

В рамках данной работы рассматривались характерные задачи анализа фактического состояния сварных трубопроводных элементов (ТЭ) с обнаруженными дефектами локального утонения стенки коррозионно-эрозионной природы, которые решались посредством высокоэффективных программных средств численного прогнозирования состояния такого рода конструкций в характерных условиях эксплуатации.

Так, к типичным задачам экспертного анализа состояния элементов магистральных трубопроводных систем, а также трубопроводов атомных и тепловых электростанций с обнаруженными в процессе дефектоскопии геометрическими аномалиями относятся:

- оценка остаточной несущей способности ТЭ с учетом расположения и размеров обнаруженного дефекта локального утонения;
- подтверждение работоспособности поврежденной конструкции в условиях статической и переменного статической нагрузки, а также высокотемпературной эксплуатации;
- вероятностная оценка склонности к разрушению в рамках комплекса процедур риск-анализа состояния производственных систем.

Для решения указанного спектра задач с минимальной консервативностью необходимо рассмотрение особенностей напряженно-деформированного состояния (НДС) ТЭ с обнаруженной эксплуатационной дефектностью, а также процессов докритического и критического разрушения материала в условиях внешнего температурно-силового воздействия. В отсутствие острых концентраторов напряжений основным механизмом разрушения материалов трубопроводов и сосудов давления является вязкое разрушение, которое заключается в зарождении и развитии равномерно распределенной пористости [3]. Изменение несущего нетто-сечения конструкции с такой поврежденностью влияет как на распределение полей

напряжений и деформаций, так и на ее несущую способность ввиду увеличения истинных напряжений. Поэтому при построении методологии численного анализа необходимо учитывать взаимосвязанные процессы формирования НДС рассматриваемого ТЭ и полей докритического повреждения его материала (распределения объемной концентрации пор  $f$ ) под действием эксплуатационных нагрузок. Кроме того, трубопроводы (как магистральные, так и технологические) в подавляющем большинстве случаев являются сварными и, в частности, характеризуются наличием областей монтажной сварки кольцевых соединений, которые не подвергаются послесварочной термической обработке и являются местами сложного остаточного НДС, что необходимо учитывать при оценке ресурса и работоспособности ТЭ в случае расположения обнаруженного дефекта локального утонения на периферии сварного шва.

Указанные выше особенности были учтены путем построения комплексной модели прогнозирования кинетики температурного поля при сварке, развития нелинейных упругопластических деформаций и напряжений совместно с микро- и макроскопическим разрушением по вязкому механизму. Так, для прогнозирования остаточного послесварочного НДС производилось моделирование температурного поля при монтажной сварке кольцевых швов. Предполагалось, что теплопередача в свариваемой конструкции определяется процессами кондуктивного теплопереноса, описание которых сводится к решению нестационарного уравнения теплопроводности [4]:

$$c\gamma(r, \beta, z, T) \frac{\partial T(r, \beta, z)}{\partial t} = \nabla [\lambda(r, \beta, z, T) \nabla T(r, \beta, z)], (1)$$

где  $T$ ,  $c\gamma$ ,  $\lambda$  – соответственно температура, объемная теплоемкость и коэффициент теплопроводности материала ТЭ в момент времени  $t$  в точке  $(r, \beta, z)$  в цилиндрической системе координат (рис. 1).

Неоднородное температурное поле, формирующееся в процессе сварки, вызывает неравномерное термомодеформирование металла и его пластическое течение, что определяет текущее и остаточное НДС в области сварки. При последующем нагружении происходит сложное взаимодействие остаточных и эксплуатационных напряжений, что вызывает дальнейшее развитие напряженного состояния, накопление пластических деформаций и сопутствующее им разрушение. Следует отметить, что в условиях высокотемпературной эксплуатации наряду с деформациями мгновенной пластичности могут развиваться необратимые деформации ползучести, которые в ряде случаев оказывают существенное влияние на длительную прочность и работоспособность ТЭ. Поэтому решение задачи численного прогнозиро-

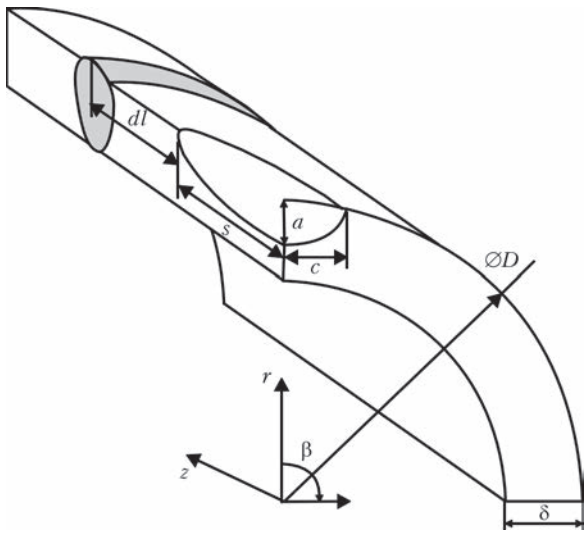


Рис. 1. Схема трубопроводного элемента с локальным дефектом потери металла в области кольцевого монтажного сварного шва

вания НДС трубопровода в условиях сварки и последующей эксплуатации при силовом или термосиловом воздействии требует учета совместного развития деформаций различной природы, а также пространственно распределенного несущего нетто-сечения конструкции, обусловленного докритическим разрушением материала по вязкому механизму.

В рамках разработанных при решении данной задачи моделей приращение компонент тензора деформаций принималось в виде суммы следующих составляющих:

$$d\epsilon_{ij} = d\epsilon_{ij}^e + d\epsilon_{ij}^p + d\epsilon_{ij}^c + \delta_{ij} (d\epsilon_T + df/3), \quad (2)$$

где  $d\epsilon_{ij}^e$ ,  $d\epsilon_{ij}^p$ ,  $d\epsilon_{ij}^c$ ,  $\delta_{ij}d\epsilon_T$ ,  $\delta_{ij}df/3$  – компоненты приращения тензора деформаций, которые обусловлены упругим механизмом деформирования, мгновенной пластичностью, ползучестью, термическим расширением и докритическим разрушением,  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера.

Условием пластического течения материала ТЭ с учетом возможности зарождения и развития равномерно распределенной пористости вязкого разрушения был выбран ассоциированный закон пластического течения модели Гурсона–Твергаарда–Нидлмана [5], условием локального зарождения вязкого разрушения в изначально неповрежденном материале принят модифицированный закон Джонсона–Кука [6], рост пористости определялся законом Райса–Трейси [7]. Предельное развитие пористости вязкого разрушения участка конструкции в конкретном напряженном состоянии может быть оценено посредством численного критерия хрупко-вязкого разрушения [8].

Решение совместной задачи напряженно-деформированного и поврежденного состояний материала ТЭ в условиях монтажной сварки и последующей эксплуатации было реализовано пу-

тем численного прослеживания деформаций термопластичности и ползучести в рамках конечно-элементной постановки. В этом случае приращение компонент тензора общих деформаций  $\Delta\epsilon_{ij}$  в каждом конкретном конечном элементе может быть представлено следующим образом [9]:

$$\begin{aligned} \Delta\epsilon_{ij} = & \left[ \Psi + \Omega(\sigma_i^*, T) \Delta t \right] (\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma) + \\ & + \delta_{ij} \left( K\sigma + \Delta\epsilon_T + \Delta f/3 \right) - \left[ \frac{1}{2G} + \Omega(\sigma_i^*, T) \Delta t \right] \times \\ & \times (\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma)^* - (K\sigma)^*, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\sigma_{ij}$  – компоненты тензора напряжений;  $\Psi$  – функция состояния упруго-пластического материала, определяющая степень развития пластического течения;  $K$  – модуль объемного сжатия;  $G$  – модуль сдвига; символ «\*» относит переменную или выражение к предыдущему шагу прослеживания;  $\Omega$  – функция ползучести материала конструкции.

Решение задачи (3) характеризуется двумя нелинейностями, а именно по пластическому деформированию и по разрушению при статических и циклических нагрузках. Для решения данных нелинейных задач были использованы итерационные алгоритмы, приведенные, в частности, в работе [8].

Конечно-элементная задача (3) на каждом этапе прослеживания и итерирования сводится к поиску решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), что дает достаточно широкие возможности программной и аппаратной оптимизации расчетов с целью их ускорения. В частности, использование параллельных алгоритмов решения СЛАУ позволяет эффективно производить расчеты с помощью персональных компьютеров с многоядерными процессорами, а также на компьютерных комплексах кластерной или гибридной архитектуры. Для этого необходимо первоначально рассмотреть следующие вопросы:

- определить, для каких видов матриц СЛАУ эффективно использовать конкретный вид распараллеливания;

- распределить задачи на подзадачи (макрооперации) и выявить информационные зависимости между ними с целью эффективного распараллеливания на различных вычислительных устройствах (центральный CPU и/или графический GPU процессоры);

- учесть структуру, объем, быстродействие памяти вычислительных устройств для обеспечения высокой эффективности алгоритма;

- обеспечить равномерную загрузку (балансирование) вычислительных элементов.

Условная блок-схема решения СЛАУ в рамках численного анализа НДС и поврежденного состо-

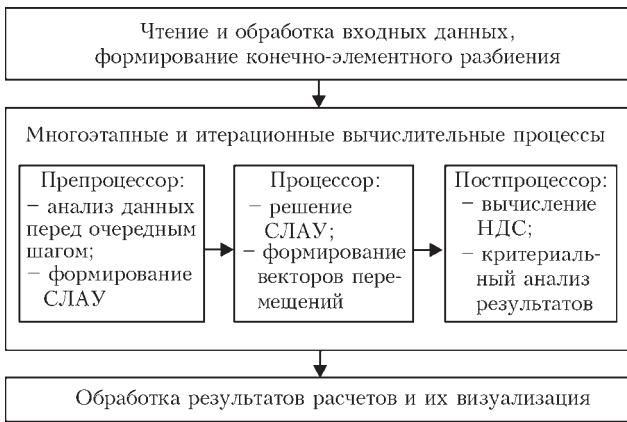


Рис. 2. Блок-схема алгоритма решения задачи численного прогнозирования напряженно-деформированного состояния трубопроводного элемента с учетом распараллеливания расчета на многопроцессорных компьютерных системах

яния ответственных ТЭ методами параллельных вычислений приведена на рис. 2. Программные алгоритмы такого расчета на компьютерах многопроцессорной, кластерной и гибридной архитектуры были реализованы в рамках программного пакета Weld Predictions, что позволило производить с его помощью исследования сложных многомерных физико-механических и технологических процессов, определяющих предельное состояние и работоспособность ответственных сварных конструкций с обнаруженными при дефектоскопии геометрическими аномалиями. В качестве примеров такого экспертного анализа с помощью разработанного программного обеспечения был рассмотрен ряд характерных случаев коррозионно-эрозионного повреждения сварных элементов магистральных и технологических трубопроводов, а именно: статическая прочность элемента магистрального трубопровода (МТ) диаметром  $D = 1420$  мм и толщиной стенки  $\delta = 20$  мм из стали 17Г1С под действием внутреннего давления и момента изгиба, а также элемента технологического трубопровода ( $D = 300$  мм,  $\delta = 15$  мм, сталь 15Х2МФА) в условиях высокотемпературной эксплуатации. В ряде случаев при анализе степени эксплуатационной коррозионной дефектности сварных конструкций целесообразно использование интегрального анализа текущего поля напряжений, в частности, путем оценки вероятности разрушения рассматриваемого конструкционного элемента. В ряде работ авторами изложен и обоснован метод расчета вероятности разрушения путем интегрирования поля главных напряжений  $\sigma_1$  в рамках статистики Вейбулла, что фактически является реализацией механизма разрушения по принципу «слабого звена» [10]:

$$p = 1 - \exp \left[ - \int_S \left( \frac{\sigma_1 - A}{B} \right)^m \frac{dS}{S_0} \right], (\sigma_1 > A), \quad (4)$$

где  $A, B, m$  – параметры Вейбулла, зависящие от характеристик прочности материала;  $S_0$  – константа

материала, характеризующая пространственный масштаб перехода микроповреждений в макродефект.

Использование результатов численного моделирования остаточного послесварочного НДС и влияния силового нагружения на конструкцию с плавными концентраторами напряжений в области локальных коррозионно-эрозионных потерь металла для оценки склонности конструкции к макроразрушению на основе (4) позволяет учитывать при анализе все компоненты тензора напряжений, а также особенности их перераспределения в условиях эксплуатации. В качестве примера на рис. 3, а показано влияние ширины  $2c$  дефекта утонения полуэллиптической формы (при фиксированных длине  $2s = 100$  мм и глубине  $a = 10$  мм) на вероятность разрушения участка МТ под действием внутреннего давления  $P$ . Как видно из приведенных результатов, влияние ширины дефекта на склонность рассматриваемого участка трубопровода невелико в рабочем диапазоне давлений (до 8 МПа), что соответствует практике эксплуатации МТ с дефектами локального утонения.

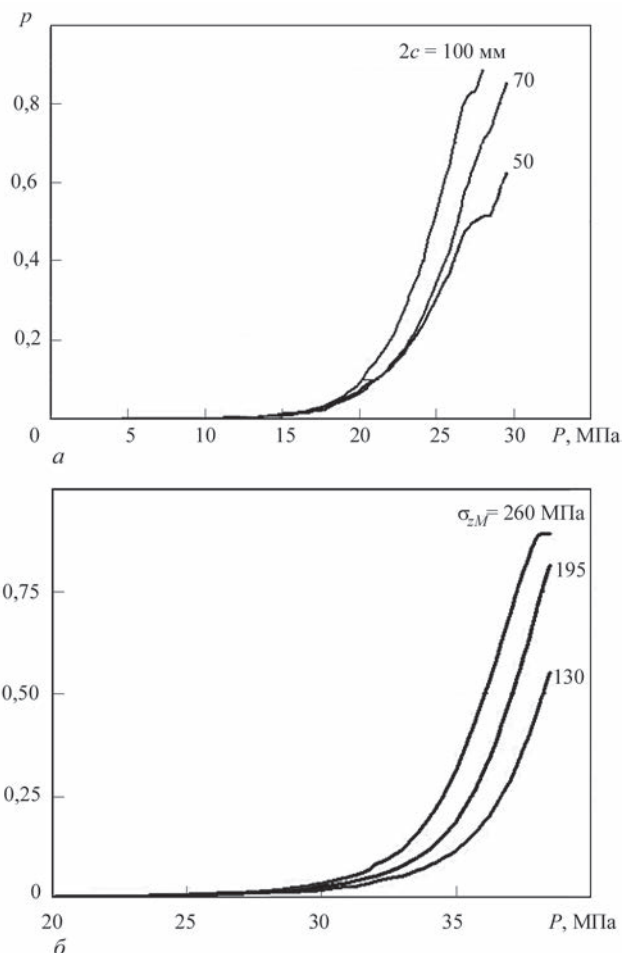


Рис. 3. Зависимости вероятности разрушения ТЭ  $p$  с внешним дефектом утонения от его ширины  $2c$  ( $a = 10$  мм,  $2s = 100$  мм) (а) и от величины положительного момента изгиба  $\sigma_{zM}$  при различных внутренних давлениях  $P$  ( $a = 9$  мм,  $2s = 100$  мм,  $2c = 80$  мм) (б)

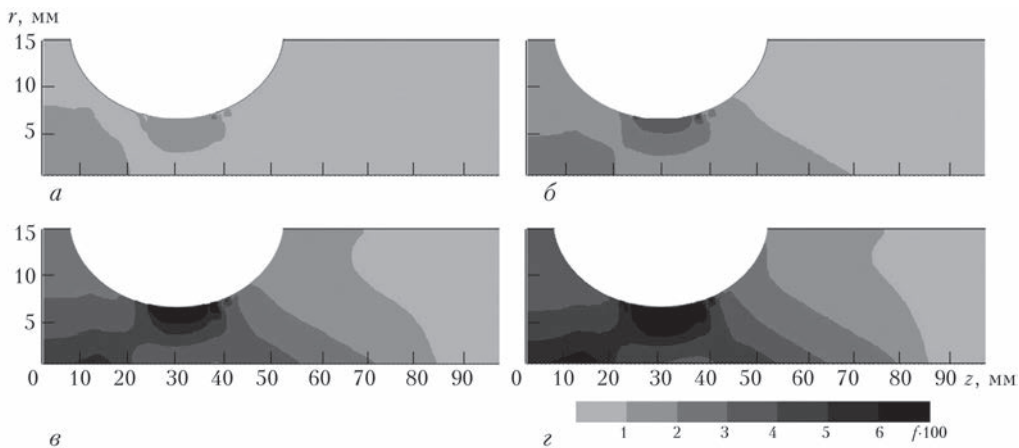


Рис. 4. Распределение докритического повреждения при высокотемпературной (650 °С) эксплуатации участка трубопровода ( $D \times \delta = 300 \text{ мм} \times 15 \text{ мм}$ ,  $P = 13 \text{ МПа}$ ) с наружным дефектом локального утонения на периферии сварного шва через различные промежутки времени: а – 400 ч; б – 800; в – 1200; з – 1480

Дополнительный момент изгиба, вызывающий избыточные продольные напряжения в области дефекта  $\sigma_{zMP}$  имеет следствием соответствующее снижение несущей способности дефектного участка МТ и нелинейный рост вероятности разрушения при различных внутренних давлениях (см. рис. 3, б). Как видно из приведенных данных, изменение величины момента изгиба при практически неизменных окружных напряжениях (фиксированном  $P$ ), т. е. увеличение осевой компоненты тензора напряжений, может существенно снижать предельное давление в трубопроводе с дефектом утонения.

Зарождение и развитие докритического повреждения материала элемента технологического трубопровода в процессе эксплуатации при повышенных температурах определяется кинетикой совместного накопления необратимых деформаций мгновенной пластичности и ползучести, особенно в области локального концентратора напряжений, которым в настоящей работе принят внешний дефект локального утонения стенки ( $2c = 40 \text{ мм}$ ,  $2s = 40 \text{ мм}$ ,  $a = 5 \text{ мм}$ ). Как показали результаты расчетов (рис. 4), изменение распределения объемного содержания пор вязкого разрушения  $f$  во времени эксплуатации в основном определяется величиной накопленных деформаций ползучести, причем на ранних этапах характерными участками максимальных значений  $f$  являются области дефекта и кольцевого шва, а при приближении к предельному состоянию ТЭ формируется характерная объединенная зона повышенной докритической поврежденности металла, что создает предпосылки к зарождению макродефекта и разрушению конструкции. При этом, чем ближе дефект расположен к сварному шву, тем раньше по времени будет формироваться совместная область пластического деформирования и разрушения и тем сильнее наличие дефекта будет влиять на несущую способность ТЭ. Этот же эффект может проявляться в случае сложного нере-

гулярного внешнего воздействия, в частности, при переменных во времени температурах. Как показано на рис. 5, при уменьшении расстояния между дефектом и сварным швом  $dl$  при модельных условиях эксплуатации (эксплуатационное давление  $P_0 = 10 \text{ МПа}$ , средняя температура  $T_0 = 650 \text{ °С}$ , размах температур  $dT = 50 \text{ °С}$ , период  $\tau = 3600 \text{ с}$ ) остаточный ресурс конструкции снижается более чем на 25 %.

Решение этих задач было проведено с использованием различных программных алгоритмов и компьютерных средств для оценки эффективности разработанных методов параллельного расчета при конечно-элементном прогнозировании развития состояния дефектного ТЭ. Так, в частности, задача анализа состояния технологического ТЭ характеризуется ленточной матрицей СЛАУ порядка 52500 с полушириной ленты 1052 и при этом использование последовательного алгоритма на обычном персональном компьютере потребовало 84 ч для проведения

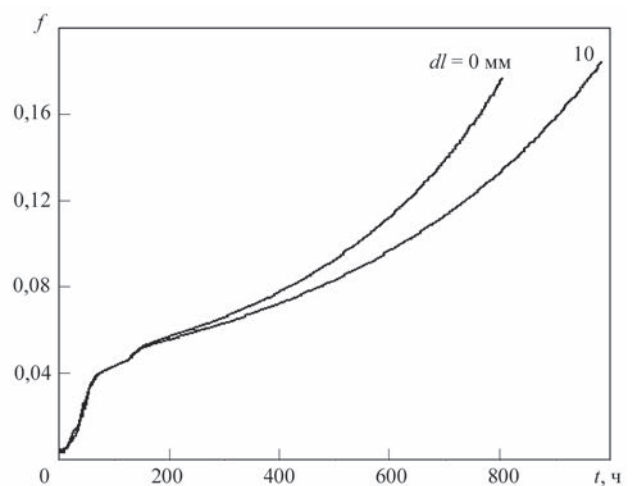


Рис. 5. Кинетика развития во времени  $t$  докритического разрушения трубопроводного элемента ( $D \times \delta = 300 \text{ мм} \times 15 \text{ мм}$ ) с дефектом локального утонения ( $a \times 2s = 7 \text{ мм} \times 50 \text{ мм}$ ) в условиях циклического изменения температуры эксплуатации ( $P_0 = 10 \text{ МПа}$ ,  $T_0 = 650 \text{ °С}$ ,  $dT = 50 \text{ °С}$ ,  $\tau = 3600 \text{ с}$ ) при различных расстояниях  $dl$  между дефектом и кольцевым швом

Таблица. Сравнение времени решения СЛАУ для характерной задачи экспертного анализа состояния трубопровода с обнаруженным дефектом локального утонения стенки при использовании различных алгоритмов реализации соответствующих математических моделей

Порядок СЛАУ	Полуширина ленты	Время решения одной СЛАУ (с) по различным алгоритмам		
		Последовательный	Параллельный	Гибридный
30912	337	6	0,75	1,50
52500	1052	210	14,28	2,93
55650	1052	170	7,08	3,96
117092	239	60	3,00	2,64
137826	4448	1500	302,70	49,00

расчета. Распараллеливание решения СЛАУ согласно блок-схемы, показанной на рис. 2, позволило сократить время расчета до 5 ч 42 мин, а подключение графического процессора в рамках гибридного алгоритма – до 1 ч 42 мин. Следует отметить, что эффективность конкретного алгоритма расчета определяется также структурой матрицы СЛАУ (порядком матрицы и полушириной ленты). Как показано в сравнительной таблице, уменьшение порядка матрицы и полуширины ее ленты (т. е. снижение дискретности пространственного разбиения конечно-элементной модели) снижает эффективность гибридного механизма расчета, что доказывает необходимость предварительного анализа особенностей конкретной задачи экспертизы дефектной конструкции при выборе наиболее эффективного алгоритма численного исследования.

**Выводы**

1. В рамках разработки нового поколения специализированного проблемно-ориентированного программного обеспечения для решения актуальных задач экспертизы состояния ответственных сварных конструкций с обнаруженными трехмерными дефектами был создан комплекс математических моделей и нового программного обеспечения на вычислительных средствах многоядерной и гибридной архитектур. Применительно к анализу работоспособности разработанные программы были интегрированы в расчетный комплекс Weld Predictions, что позволило в режиме реального времени проводить исследования кинетики полей температур, напряжений, деформаций, докритического и критического повреждения трубопроводных элементов и сосудов давления в условиях сложного внешнего эксплуатационного температурно-силового воздействия с учетом обнаруженных в процессе дефектоскопии локальных коррозионно-эрозионных потерь металла.

2. На характерных примерах эксплуатационной поврежденности трубопроводных элементов магистральных и технологических систем исследованы особенности влияния локальных поверхностных потерь металла на развитие их докритической поврежденности, предельного состояния и работо-

способности. Показано влияние дефекта локального утонения стенки различного размера на степень снижения статической прочности элемента магистрального трубопровода под действием внутреннего давления, а также дополнительного внешнего изгибающего момента. Кроме того, применительно к технологическому трубопроводу из стали 15Х2МФА исследованы характерные особенности влияния дефекта коррозионно-эрозионной потери металла на работоспособность в условиях высокотемпературной эксплуатации. Показано, что изменение распределения объемного содержания пор вязкого разрушения во времени определяется преимущественно величиной накопленных деформаций ползучести, причем если на ранних этапах характерными участками максимальных значений докритической поврежденности являются области дефекта и монтажного кольцевого шва, то при приближении к предельному состоянию трубопроводного элемента формируется характерная объединенная зона повышенной докритической поврежденности металла, что создает предпосылки к зарождению макродефекта и разрушению конструкции.

3. Показано, что эффективность конкретного алгоритма расчета определяется структурой матрицы СЛАУ. В частности, уменьшение порядка матрицы и полуширины ее ленты снижает эффективность гибридного механизма расчета, что доказывает необходимость предварительного анализа особенностей конкретной задачи экспертизы дефектной конструкции при выборе рационального алгоритма численного исследования.

**Список литературы**

1. Escoe A. K. (2006) Piping and pipelines. Assessment Guide. Texas, Gulf Professional Publishing.
2. Стрельникова Е. А., Ковч О. И. (2015) Исследование взаимного влияния пор в сварном шве под воздействием термосилового нагружения. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, 5, 59–63.
3. Lemaitre J., Desmorat R. (2005) *Engineering Damage Mechanics. Ductile, Creep, Fatigue and Brittle Failures*. Berlin, Springer-Verlag.
4. Radaj D. (1992) *Heat Effects of Welding. Temperature Field, Residual Stress, Distortion*. Berlin, Springer Verlag.
5. Xue L. (2007) Damage accumulation and fracture initiation in uncracked ductile solids subject to triaxial loading. *Int. J. of Solids and Structures*, 44, 5163–5181.



6. Великоиваненко Е. А., Розынка Г. Ф., Миленин А. С. и др. (2013) Моделирование процессов зарождения и развития пор вязкого разрушения в сварных конструкциях. *Автоматическая сварка*, **9**, 26 – 31.
7. Карзов Г. П., Марголин Б. З., Швецова В. А. (1993) Физико-механическое моделирование процессов разрушения. Санкт-Петербург, Политехника.
8. Великоиваненко Е. А., Миленин А. С., Розынка Г. Ф. и др. (2016) Моделирование процессов зарождения и развития докритической поврежденности металла сварных трубопроводных элементов при малоцикловом нагружении. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **4**, 14–20.
9. Махненко В. И. (2006) *Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций*. Киев, Наукова думка.
10. Миленин А. С., Великоиваненко Е. А., Розынка Г. Ф. и др. (2014) Вероятностная оценка состояния трубопроводных элементов с обнаруженными дефектами утонения. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **2**, 12–18.

**References**

1. Escoe, A.K. (2006) *Piping and pipelines. Assessment guide*. Texas, Gulf Professional Publishing.
2. Strelnikova, E.A., Kovch, O.I. (2015) Examination of reciprocal influence of pores in weld under impact of thermal force load. *East-European J. of Advanced Technologies*, **5**, 59-63 [in Russian].
3. Lemaitre, J., Desmorat, R. (2005) *Engineering damage mechanics. Ductile, creep, fatigue and brittle failures*. Berlin, Springer-Verlag.
4. Radaj, D. (1992) *Heat effects of welding. Temperature field, residual stress, distortion*. Berlin, Springer-Verlag.
5. Xue, L. (2007) Damage accumulation and fracture initiation in uncracked ductile solids subject to triaxial loading. *Int. J. of Solids and Structures*, **44**, 5163-5181.
6. Velikoivanenko, E.A., Rozyinka, G.F., Milenin, A.S. et al. (2013) Modelling of processes of nucleation and development of ductile fracture pores in welded structures. *The Paton Welding J.*, **9**, 24-29.
7. Karzov, G.P., Margolin, B.Z., Shvetsova, V.A. (1993) *Physical-mechanical modeling of fracture processes*. St.-Petersburg, Politekhnikha [in Russian].
8. Velikoivanenko, E.A., Milenin, A.S., Pozyinka, G.F. et al. (2016) Simulation of processes of initiation and propagation of subcritical damage of metal in welded pipeline elements at low-cycle loading. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **4**, 14-20 [in Russian].
9. Makhnenko, V.I. (2006) *Resource of safety operation of welded joints and components of modern structures*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
10. Velikoivanenko, E.A., Rozyinka, G.F., Milenin, A.S. et al. (2014) Probabilistic estimate of the condition of pipeline elements with detected thinning defects. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **2**, 12-18 [in Russian].

**ВИСОКОПРОДУКТИВНІ МЕТОДИ ЧИСЕЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ДЛЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ ЕКСПЕРТИЗИ РОБОТОЗДАТНОСТІ ДЕФЕКТНИХ КОНСТРУКЦІЙ**

О. С. МІЛЕНІН<sup>1</sup>, О. А. ВЕЛИКОІВАНЕНКО<sup>1</sup>, Г. П. РОЗИНКА<sup>1</sup>, Н. І. ПІВТОРАК<sup>1</sup>, О. М. ХІМІЧ<sup>2</sup>, В. А. СІДОРУК<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Інститут електросварювання ім. Є. О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>Інститут кібернетики ім. В. М. Глушкова НАН України. 03187, г. Київ, прос. Академіка Глушкова, 40. E-mail: incyb@icyb.kiev.ua

Стосовно до характерних задач експертизи роботоздатності тру-

бопровідних елементів з виявленими дефектами локальної корозійно-ерозійної втрати металу розроблено комплекс моделей для оцінки граничного стану в умовах складного температурно-силового експлуатаційного впливу методом чисельного прогнозування багатовимірного напружено-деформованого стану, докритичного і критичного пошкодження матеріалу конструкції з урахуванням різних механізмів деформування при зовнішньому навантаженні. Для програмної реалізації моделей було використано скінченно-елементне розв'язання спільних задач кінетики стану конкретного дефектного трубопроводу за допомогою нових високопродуктивних методів паралельного обчислення на основі багатопроцесорних і гібридних комп'ютерних технологій. На прикладах трубопровідних елементів магістральних і технологічних систем досліджені особливості впливу локальних поверхневих втрат металу на розвиток їх докритичного пошкодження, граничного стану і роботоздатності. Показано вплив дефекту локального стоншування стінки різного розміру на ступінь зниження статичної міцності елемента магістрального трубопроводу під дією внутрішнього тиску, а також додаткового зовнішнього моменту згину. Також показано, що на ефективність проведення чисельних розрахунків конкретного алгоритму значний вплив має структура визначальної матриці системи лінійних рівнянь. Бібліогр. 10, табл. 1, рис. 5.

Ключові слова: трубопровідний елемент, дефект несучільності металу, граничний стан, роботоздатність, чисельне прогнозування, високопродуктивні програмні засоби

**HIGH-PERFORMANCE METHODS OF NUMERICAL STUDIES FOR SOLVING THE PROBLEMS OF EVALUATION OF DEFECTIVE STRUCTURE SERVICEABILITY**

A.S.MILENIN<sup>1</sup>, E.A.VELIKOIVANENKO<sup>1</sup>, G.F.ROZYINKA<sup>1</sup>, N.I.PIVTORAK<sup>1</sup>, A.N.KHINICH<sup>2</sup>, V.A.SIDORUK<sup>2</sup>

<sup>1</sup>E.O.Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine 11 Kazimir Malevich str., 03150, Kiev. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>V.M.Glushkov Institute of Cybernetics of the NAS of Ukraine, 40 Akad. Glushkov prosp., 03187, Kiev. E-mail: incyb@icyb.kiev.ua

A set of models was developed for assessment of the limit state under the conditions of complex temperature-force service impact by the method of numerical prediction of multidimensional stress-strain state, subcritical and critical damage of structure materials, allowing for different deformation mechanisms at external loading for the case of characteristic problems of evaluation of serviceability of pipeline elements with detected defects of local corrosion-erosion metal loss. Software implementation of the model was performed by applying finite-element solution of joint problems of kinetics of the state of a specific defective pipeline by applying new high-efficient methods of parallel computation, based on multiprocessor and hybrid computer technologies. Features of the influence of local surface losses of metal on development of their subcritical damage, limit state and serviceability, were studied in the cases of service-induced damage of pipeline elements of the main and process systems. It is also shown that the efficiency of a specific algorithm of numerical calculations is significantly affected by the structure of the defining matrix of the system of linear equations. 10 References, Table 1, Fig. 9.

Keywords: acoustic emission, 103-D reactor, propagating defects, continuous monitoring, residual life

Поступила в редакцію 10.01.2018

# ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ ПРИ ОЦЕНКЕ СОСТОЯНИЯ СОСУДОВ ХИМИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

А. Я. НЕДОСЕКА, С. А. НЕДОСЕКА, М. А. ЯРЕМЕНКО, М. А. ОВСИЕНКО

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Рассмотрены результаты проведенных испытаний методом акустической эмиссии реактора типа 103-D, применяемого в производстве аммиака, в процессе эксплуатации. Показано, что в сосуде на момент испытаний формируются области с концентрацией дефектов. Отмечено, что в дальнейшем эти области могут накапливать развивающиеся дефекты, которые будут представлять определенную опасность, классифицируемую шкалой прогнозного алгоритма испытательной аппаратуры, в связи с чем для таких конструкций рекомендуется непрерывный мониторинг и периодическая оценка ресурса. Библиогр. 12, табл. 1, рис. 9.

*Ключевые слова:* акустическая эмиссия, реактор 103-D, развивающиеся дефекты, непрерывный мониторинг, ресурс

Испытание конструкций в процессе эксплуатации с оценкой разрушающей нагрузки и остаточного ресурса является весьма важной задачей [1]. Эксплуатация потенциально опасных объектов химического производства тесно связана с вопросом экологии окружающей среды и требует уделять большое внимание технологиям, обеспечивающим ее безопасность. Таковой в настоящее время является технология, основанная на методе акустической эмиссии (АЭ), отслеживающем активность постепенно разрушающихся в процессе эксплуатации материалов [2–4]. Технология позволяет в реальном времени предупреждать о возникшей опасности и прогнозировать разрушение [5–9].

На примере контроля состояния химического реактора типа 103-D, работающего в производстве аммиака, покажем особенности применения такой технологии на базе диагностической системы ЕМА. В таблице приведены технические характеристики из паспорта реактора 103-D.

Отметим, что данная технология, как и любая другая технология, основанная на определенных научных

исследованиях и разработках с применением специальных контролирующих приборов и алгоритмов, работает с определенной, наперед заданной вероятностью, что позволяет четко понимать, в каких пределах достоверности следует ожидать правильного решения о состоянии контролируемых объектов.

Опыт ИЭС им. Е. О. Патона в применении метода АЭ для определения технического состояния объектов, работающих при различных температурах, показал, что методические трудности, связанные с установкой датчиков АЭ, проведением измерений и оценке их результатов, могут быть эффективно преодолены. Об этом свидетельствует позитивный опыт многолетней работы систем непрерывного АЭ мониторинга, в том числе на изотермических резервуарах для хранения жидкого аммиака и высокотемпературных объектах цеха производства аммиака Одесского припортового завода (ОПЗ), барабанах котлов и паропроводах ТЭЦ-5 и ТЭЦ-6 СВП «Киевские ТЭЦ» [10–12].

Для проведения акустико-эмиссионного контроля реактора вторичного риформинга 103-D использовалась система технической диагностики ЕМА-4.

Испытания проводили в рабочем состоянии объекта и в условиях определенных ограничений по времени контроля.

Учитывая то, что доступ к значительной части поверхности реактора был ограничен, места расположения датчиков были выбраны, исходя из возможности имеющегося доступа к отдельным участкам реактора. При этом предварительные настройки, необходимые при стандартных испытаниях такого типа объектов, проводились с использованием специальных приемов, позволяющих оценить наличие зон, находящихся в области до-

## Технические характеристики реактора 103-D

Наименование, позиция аппарата	Реактор вторичного риформинга 103-D
Дата изготовления, введения в эксплуатацию, изготовитель	20.09.1978, 23.03.1981 фирма «Кгирр», Германия
Материал-аналог WStE36	Сталь 17Г1С, $\sigma_B = 510$ МПа; $\sigma_T = 345...355$ МПа
Среда в аппарате	Конвертированный газ ( $H_2 - 60\%$ , $N_2 - 20\%$ , $CO - 10\%$ , $CO_2 - 10\%$ )
Объем, л	112,0
Рабочие параметры: давление $P$ , кг/см <sup>2</sup> , температура $T$ , °С	35,5 (паспорт) 32,4 (рабочее) 205 (стенка корпуса)

сягаемости, аппаратурой АЭ. В результате датчики АЭ были установлены так, чтобы можно было обеспечить контроль реактора в целом.

Проведенные испытания показали, что, несмотря на упомянутые ограничения, объект является контролепригодным, а обнаруженные источники АЭ могут служить достаточным основанием для классификации текущего состояния изделия по степени опасности. Возможность такой классификации позволяет при необходимости перейти к непрерывному АЭ мониторингу реактора с оценкой его состояния.

На рис. 1. схематически показано, что основные контролируемые датчики располагались по кольцу в верхней и нижней части реактора.

В течение 5 ч была выполнена серия из пяти испытаний средней продолжительностью 30 мин

каждое. Учитывая достаточно высокую зашумленность объекта контроля (средний уровень шума достигал 36 дБ) и наличие замкнутой поверхности, что приводит к переотражениям и кольцевому повторению сигналов АЭ, были использованы следующие ограничения:<sup>\*</sup>

- программный фильтр нижних частот – 25 кГц;
- максимальное время нарастания сигнала – 1250 мкс.

Отметим сразу, что ряд датчиков, расположенных на боковой поверхности, не показал акустической активности, и основные представленные экспериментальные данные базируются на показаниях датчиков верхнего и нижнего колец. Датчики нижнего кольца расположены на фланце и соответствуют номерам каналов АЭ 33, 34, 35. Датчики верхнего кольца расположены на крыш-

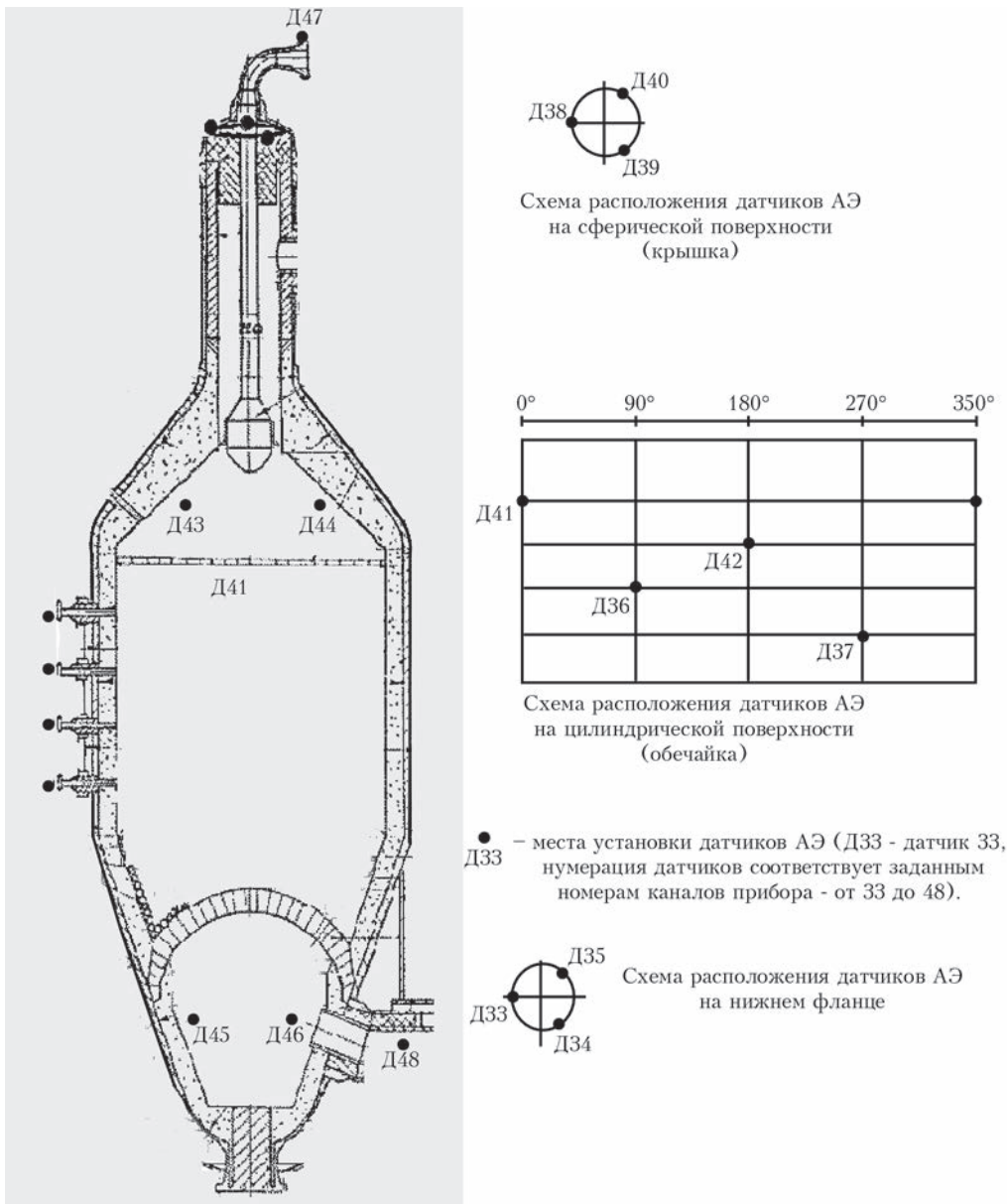


Рис. 1. Общая схема изделия с установленными датчиком АЭ

<sup>\*</sup> Указанные настроечные характеристики связаны с техническими возможностями аппаратуры ЕМА-4.

ке реактора и соответствуют номерам каналов АЭ 38, 39, 40.

АЭ контроль проводили в режиме зонной локации с использованием встроенного алгоритма прогноза разрушающей нагрузки. При этом выполняли запись всей полученной АЭ информации. Используемый тип локации на нее не влияет и может быть многократно изменен при компьютерном повторе проведенных испытаний, так как программное обеспечение для систем ЕМА версии 3.91 позволяет уже после проведения измерений изменять конфигурации локационных антенн, обеспечивая различные представления данных и повышая, таким образом, информативность метода. При последующей обработке информации использовали три разных представления данных: в виде двух замкнутых антенн из датчиков нижнего (33, 34, 35) и верхнего (38, 39, 40) колец; в виде цилиндрической антенны из датчиков верхнего и нижнего колец, а также трех вертикально расположенных линейных антенн, состоящих из двух датчиков каждая (33-38, 34-39, 35-40).

Поскольку боковая поверхность реактора имеет переменный диаметр, цилиндрическая антенна не может быть использована для точной локации источников АЭ, так как датчики верхнего и нижнего поясов размещены выше и ниже обечайки на радиусах, меньших радиуса обечайки, и такой тип представления данных контроля используется лишь для оценки общей картины АЭ на поверхности реактора.

Линейные антенны, наоборот, позволяют получить координату источника АЭ в вертикальном направлении (снизу-вверх) изделия, но дают менее обобщенную картину АЭ на поверхности. Аналогично кольцевые антенны показывают, в каком из вертикальных сечений наблюдается наибольшая АЭ активность. При этом можно утверждать, что вблизи той антенны, которая показывает большую акустическую активность, состояние материала оболочки хуже.

В представленных ниже результатах для наиболее типовых испытаний показаны источники АЭ на схемах цилиндрической, кольцевой и линейной локации в виде снимков экранов программы ЕМА-3.91 (рис. 2–5). Флажками показаны сформированные кластеры событий АЭ, цифрами на флажках – число событий, вошедших в данный кластер.

Отдельно для каждого типа локации построены графики АЭ в зависимости от времени (рис. 6–8). На графиках линиями показано значение текущего шумового фона (т. е. непрерывной АЭ, обозначенной как  $A_v$ ), измеряемого в дБ, столбиками показаны значения амплитуд  $A$  событий АЭ, вошедших в кластеры, отдельно для каждой антенны, измеряемых также в дБ; точками – значение частоты сигналов для этих же событий, измеряемой в Гц.

Вначале приведем исходный результат одного наиболее показательного испытания, выполненного в режиме зонного контроля без дополнитель-

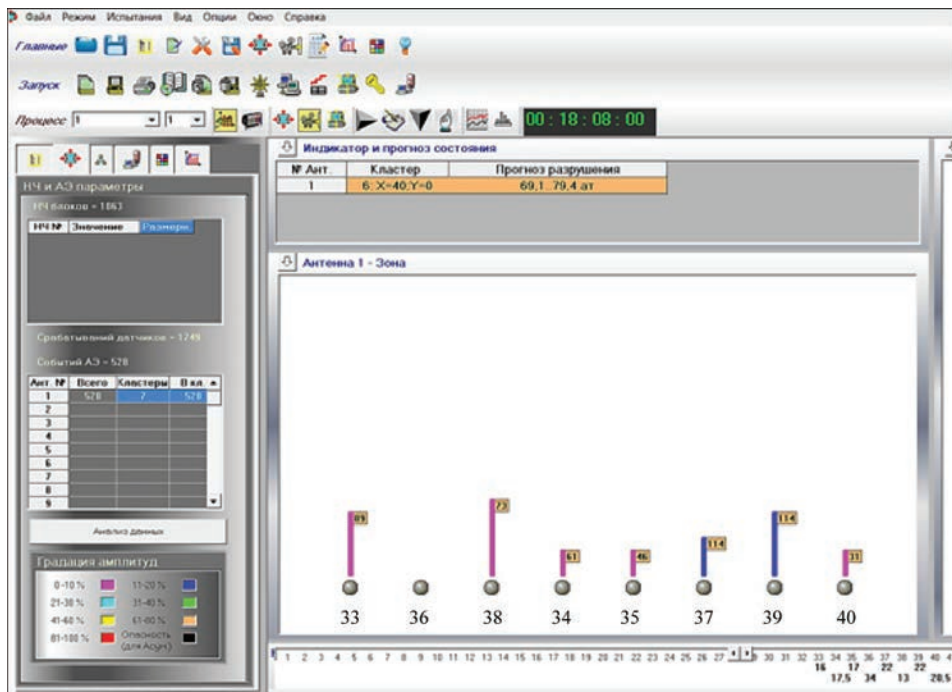


Рис. 2. Рабочий экран программы ЕМА 3.91. Результат зонной локации для одного из испытаний с прогнозом разрушающего давления (полоса прогноза состояния в верхней части окна). Цифры внутри флажков показывают количество сигналов АЭ в контролируемом секторе. Цифрами (внизу) показаны номера датчиков. Для датчиков 33, 38, 34, 35, 40 – амплитуда от 0 до 10 %. Для датчиков 37, 39 – амплитуда от 11 до 20 %. Датчик 36 не активен. В левой и верхней части экрана – окна текущей информации и кнопки управления испытаниями и их повтором

ной обработки (рис. 2). Поскольку последующая обработка данных показала в целом нормальное состояние оболочки реактора, было принято решение выполнить оценочный прогноз разрушающей нагрузки именно на показаниях АЭ, полученных в режиме зонной локации. Основное отличие данного режима – невозможность выделить конкретные опасные области объекта контроля и разделить шумы двух видов – генерируемые собственнo объектом и посторонние, связанные с технологическими процессами.

Как правило, режим зонной локации показывает значительно большее число событий АЭ, чем локация с определением координат. В связи с этим для оценочного прогноза разрушающей нагрузки применен специальный весовой алгоритм. Такой метод можно рекомендовать к использованию только тогда, когда АЭ активность объекта контроля, определяемая методом поиска координат источников, является незначительной.

Данные, представленные предприятием, эксплуатирующим объект, показали, что в процессе всех проведенных испытаний рабочее давление практически не менялось и составляло 31...32,4 кг/см<sup>2</sup>. Прогноз разрушения показал разрушающую нагрузку в интервале 115,1...132,4 кг/см<sup>2</sup>.

Учитывая класс стали (17Г1С) и размеры реактора, расчетное опасное напряжение в материале составляет  $(288 \times 69,1)/5,4 = 299 \text{ МПа}^{**}$ .

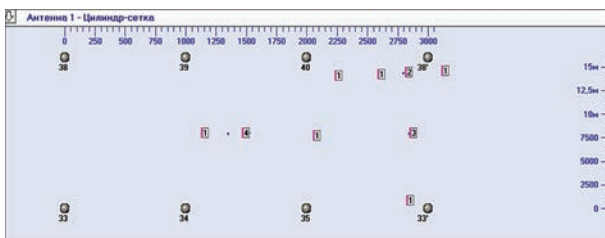


Рис. 3. Схема расположения кластеров АЭ источников на экране программы ЕМА-3.91 при использовании цилиндрической локации в условиях наибольшей АЭ активности. Цифрами показано количество событий в кластере

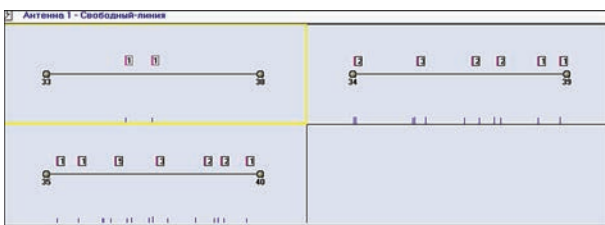


Рис. 4. Схема расположения кластеров АЭ источников на экране программы ЕМА-3.91 при использовании линейной локации в условиях наибольшей АЭ активности. В нижней части графиков штрихами показаны некластеризованные события

Принимая во внимание высокие температуры внутри корпуса реактора – до 1032 °С, и более 200 °С в несущей цилиндрической оболочке, а также 36 лет его наработки, можно отметить, что работа в таких условиях повлияла на предел длительной прочности в сторону его понижения по сравнению с исходным значением предела прочности, составляющим 400 МПа при 200 °С.

В то же время анализ результатов локации, избирательно представленных ниже, показывает, что исчерпания несущей способности реактора не произошло. При этом продолжается постепенное накопление повреждений и деградация свойств материала.

На рис. 3 показаны результаты одного из испытаний в представлении цилиндрической локации, характерное наибольшим по сравнению с другими испытаниями количеством событий АЭ на поверхности оболочки реактора. Несколько образовавшихся кластеров АЭ активности показывают, что наибольшее число событий возникло в квадранте, образованном датчиками 33-35-38-40. Активность обнаруженных источников АЭ невелика, максимальное число событий в одном кластере не превышает четырех. Выявленные источники АЭ, сформировавшие кластеры, в соответствии с ДСТУ 4227-2003 [2] можно отнести к малоактивным (I-II класс). Аналогичное распределение по классам источников наблюдается и при просмотре результатов испытаний в режимах линейной и кольцевой локации (рис. 4, 5).

Сравнивая результаты цилиндрической и кольцевой локации, можно отметить совпадение основных квадрантов АЭ активности, образованных датчиками 33-35-38-40. При этом, однако, в верхней части реактора кольцевая антенна показывает значительно меньшую АЭ активность (датчики нижнего кольца расположены на фланце).

Графики АЭ параметров, распределенных во времени, приведенные для некоторых локационных рис. 6, 7, показательны тем, что видно, как в процессе испытания АЭ события возникают достаточно редко и равномерно. При этом

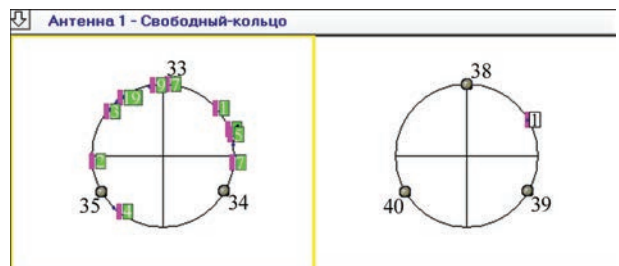


Рис. 5. Схема расположения кластеров АЭ источников на экране программы ЕМА-3.91 при использовании кольцевой локации в условиях наибольшей АЭ активности

\*\* Расчеты выполнены по формуле:  $\sigma = rp/\delta$ , где  $r$  – радиус цилиндрической части сосуда, см;  $p$  – разрушающее давление внутри сосуда, кг/см<sup>2</sup>;  $\delta$  – толщина стенки цилиндрической части сосуда, см. Данные взяты из паспорта изделия и рис. 2.

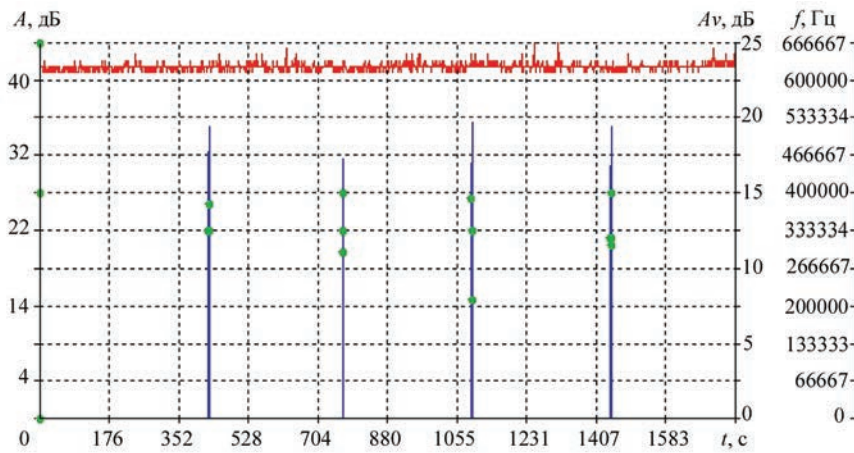


Рис. 6. Уровень шума, значения амплитуд и частот сигналов АЭ для линейной локационной антенны при испытании № 1. Датчики 35, 40

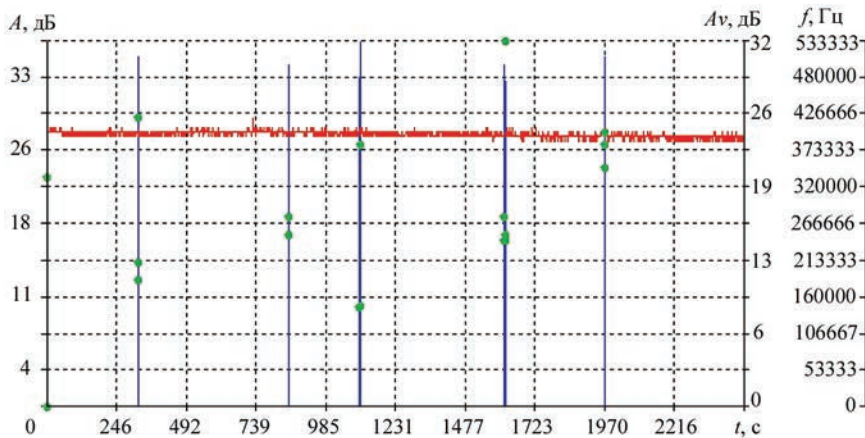


Рис. 7. Уровень шума, значения амплитуд и частот сигналов АЭ для линейной локационной антенны при испытании №2. Датчики 35, 40

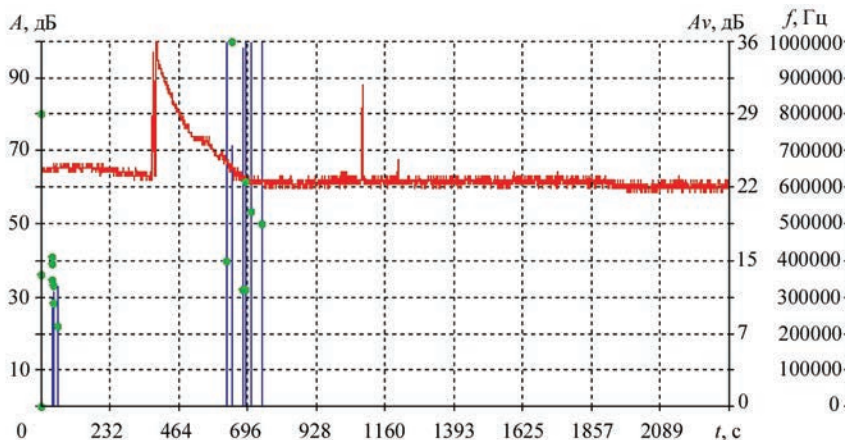


Рис. 8. Уровень шума, значения амплитуд и частот сигналов АЭ для общей цилиндрической антенны при испытании № 4

величина среднего шума не превышает 32 дБ, амплитуды сигналов 45 дБ, частоты сигналов составляют порядка 400 кГц.

Однако следует отметить, что в процессе одного из испытаний (4-е из серии) наблюдались резкие внезапные изменения параметров АЭ при неизменных рабочих параметрах (рис. 8). При этом четко видно отличие параметров АЭ в сравнении с теми, которые представлены на рис. 6, 7. Помимо скачкообразного изменения шума зарегистри-

рованы события АЭ с амплитудой до 100 дБ и частотой до 1 МГц. Учитывая практически неизменные рабочие параметры изделия, можно предположить, что АЭ системе удалось зафиксировать один из моментов резкого накопления повреждений в корпусе реактора.

Подведем краткие итоги результатов проведенных испытаний.

В процессе испытаний реактора 103-D было зарегистрировано большое количество одиночных

срабатываний датчиков АЭ. Обработка полученных данных показала, что на основе указанных срабатываний можно сформировать события АЭ, пригодные для дальнейшего анализа текущего состояния материала.

Сформированные события АЭ и их кластерный анализ позволяют сделать вывод о постепенном развитии в материале оболочки реактора рассеянных повреждений, которые в перспективе могут вызвать образование трещин и разрушение, но на момент проведения контроля не представляют опасности. Большинство выявленных источников АЭ излучают волны высокого частотного диапазона до 1 МГц включительно, в связи с чем не могут относиться к технологическим шумам (обычно не превышающим 25 кГц), а связаны с развитием повреждений в материале.

Отмечено наличие источников АЭ малой активности в районе верхней и нижней полусфер, в средней части корпуса реактора. Выявленные источники АЭ, сформировавшие кластеры, в соответствии с ДСТУ 4227-2003 [2] можно отнести к малоактивным (I-II класс), поскольку наибольшее число событий в кластере, зарегистрированное при испытаниях, не превышает 10. Амплитуда событий АЭ невысока, не более 45 дБ, и превышает максимальное значение шумового фона (36 дБ) всего на 9 дБ. Согласно принятой классификации такие источники опасности не представляют и, следовательно, эксплуатация реактора на режимах, установленных на момент проведения АЭ испытаний, может быть продолжена.

Наличие АЭ активности на объекте контроля, а также зафиксированный в процессе одного из испытаний в проведенной серии резкий скачок шумового фона свидетельствуют о том, что процессы накопления повреждений и развития разрушения в реакторе должны и дальше отслеживаться с применением метода АЭ.

Оценочный расчет, основанный на автоматически выполняемом АЭ системой прогнозе разрушающей нагрузки, показал вероятное снижение предела длительной прочности.

По результатам проведенного контроля сформировано предложение оснастить реактор системой непрерывного АЭ мониторинга. Учитывая постоянную необходимость продления ресурса и обнаруженные множественные источники АЭ на рабочих режимах, такое решение представляется оптимальным. Различия между разными способами АЭ контроля – такими, как разовый контроль, периодический контроль, мониторинг и непрерывный мониторинг, позволили сформулировать основные принципы организации контроля и их особенности для реакторов типа 103-D. Непрерывный АЭ мониторинг лишен таких рассмотрен-

ных недостатков, как создание неоднократных перегрузок конструкции в процессе испытаний, отсутствие контроля за состоянием объекта после завершения очередного испытания.

Принятая в данной работе схема размещения датчиков АЭ может быть использована при непрерывном мониторинге реакторов типа 103-D, но не представляется оптимальной и нуждается в более тщательной проработке при составлении проекта мониторинговой системы.

Рассмотрим далее вопрос об остаточном ресурсе в общей постановке, поскольку все сказанное ниже применимо не только к данному типу реакторов, а и к любым конструкциям, обеспеченным непрерывным АЭ мониторингом с использованием представленной технологии. Очевидно, что для оценки ресурса может быть использован практически любой параметр состояния материала [7], изменяющийся вследствие деградации свойств материала при эксплуатационной наработке. На этом принципе, в частности, базируется построение диаграмм Веллера при циклическом нагружении. Но если в случае циклического нагружения образцов закономерность падения несущей способности всегда является известной и легко описываемой математически, то при эксплуатации реальных конструкций ситуация совершенно иная. Многие конструкции подвергаются нагружению неравномерно, так что нельзя отследить конкретные циклы и описать их некими уравнениями. Часто циклическая составляющая в нагрузке носит незначительный характер, и на накопление повреждений и развитие разрушения влияют совсем другие факторы – коррозия, динамические, ветровые нагрузки, длительная прочность и т. д. Следует сюда же добавить невозможность, зачастую, провести какие-либо механические неразрушающие обследования объекта контроля типа измерений твердости на отдельных участках или, в случае наличия изоляции, практически на всей поверхности.

Если объект контролируется непрерывно методом АЭ, возможность оценить его остаточный ресурс существует. Прежде всего это обеспечивается поступлением информации о его состоянии со всей поверхности, независимо от наличия изоляции и других затруднений в доступе. Применение АЭ систем типа ЕМА позволяет выделить кластеры с наибольшей акустической активностью и для каждого из них получить прогноз разрушающей нагрузки. Этой информации вполне достаточно для получения оценочного ресурса. Для этого предлагается использование двух методов, либо по отдельности, либо в комплексе, с выбором окончательного прогнозного ресурса по меньшему из рассчитанных.

Оценочный остаточный ресурс по первому методу рассчитывается для постоянно регистрируемых кластеров АЭ активности, которая при развитии разрушения в зависимости от свойств материала имеет тенденцию к повышению или понижению [8, 9]. Изменение величины обратной активности можно экстраполировать по времени. Достижение некоторой критической величины покажет исчерпание ресурса. Трудность применения данного метода заключается в том, что необходимо назначить некое критическое значение АЭ активности, при котором наступает исчерпание несущей способности материала.

Оценочный остаточный ресурс по второму методу [1, 5, 9] рассчитывается путем экстраполяции во времени прогнозной разрушающей нагрузки (рис. 9). Пересечение экстраполированной кривой с уровнем штатной нагрузки показывает время, оставшееся до исчерпания ресурса. Таким образом, данный метод лишен недостатка первого, поскольку имеется критическое значение, ниже которого ресурс считается исчерпанным. Отметим, что использование линейной экстраполяции изменения АЭ активности либо разрушающей нагрузки при разовом контроле не позволяет дать нормированную оценку ресурса и работает в большой запас. Любой же другой метод экстраполяции нуждается в дополнительных промежуточных сведениях о поведении материала. Еще одним препятствием к нормированию остаточного ресурса является недостаточный объем статистики по разрушению конструкций, для которых ресурс был тем или иным образом спрогнозирован по данным АЭ мониторинга. Проверка метода в основном осуществлялась на промышленных крупномасштабных элементарных конструкциях – трубы, баки. Эксперименты же по разрушению натуральных конструкций сложной геометрии слиш-

ком дорогостоящи, а применение систем ЕМА в промышленности направлено, напротив, на недопущение разрушения. С этими задачами разработанная АЭ технология успешно справляется на протяжении десятков лет.

Тем не менее, оценочный ресурс является важным показателем, так как изменение его прогнозного значения показывает тенденцию развития повреждаемости в процессе наработки, а заодно и влияние определенных режимов эксплуатации на темпы этого развития. В тоже время применение непрерывного мониторинга при контроле состояния материала конструкций позволяет решить многие возникающие вопросы и повысить точность оценок.

Можно также отметить то, что существующая нормативная база по применению АЭ технологии в контроле состояния материалов эксплуатирующихся конструкций существенно помогает и регламентирует процесс организации и проведения испытаний и является одним из основных рычагов получения положительного опыта использования систем АЭ мониторинга в промышленности [3, 8–12]. Следует отметить большое значение ГОСТ 26656-85; 27518-87; 20911-89 по технической диагностике, используемых при оценке состояния сварных конструкций и внесших существенный вклад в технологию контроля.

**Выводы**

Проведены испытания работоспособности реактора типа 103-D, работающего в цепи производства аммиака.

При установке АЭ датчиков на действующей конструкции и расчете разрушающей нагрузки были учтены особенности конструкции реактора, связанные с его геометрией и участками с относительно невысокой температурой.

Полученная картина распределения источников АЭ на поверхности изделия не является опасной на момент проведения контроля. В то же время полученные результаты говорят о формировании областей, где с течением времени в результате развития обнаруженных дефектов могут появиться опасные. Поэтому эти области подлежат дальнейшему повышенному вниманию.

Система АЭ контроля показала, что разрушающая нагрузка на момент проведения испытаний находится ниже нагрузки, определяемой пределом прочности и текучести материала в исходном состоянии, но существенно выше рабочей, равной 32,5 кг/см<sup>2</sup>.

Представлены методы, позволяющие оценить остаточный ресурс материала конструкций с применением АЭ технологии.

Для системной оценки состояния реактора и определения его остаточного ресурса необходим непрерывный мониторинг.

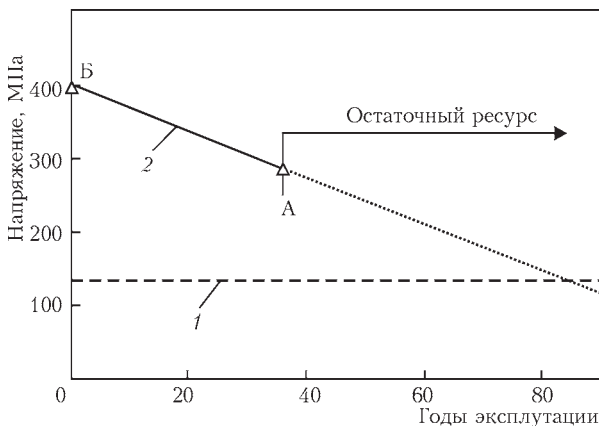


Рис. 9. Оценочный остаточный ресурс реактора (сталь 17Г1С) после 36 лет эксплуатации: 1 – рабочая нагрузка; 2 – прогнозируемый предел длительной прочности материала. Т. А соответствует прочностным свойствам материала после 36 лет эксплуатации при температуре 200 °С, т. Б – исходный предел прочности материала



## Список литературы

1. Недосека А. Я. (2008) *Основы расчета и диагностики сварных конструкций*. Патон Б. Е. (ред.). Киев, Индпром.
2. (2003) ДСТУ 4227-2003 *Настанови щодо проведення акустико-емісійного діагностування об'єктів підвищеної небезпеки*. Держстандарт України.
3. (2006) СОУ 50.07-2006 *Методичні рекомендації з акустико-емісійного діагностування обладнання основних виробництв хімічної, нафтохімічної та нафтогазопереробної промисловості. Загальні вимоги*. ТК-78, Київ.
4. (2012) СОУ 50.10-2012 *Настанови щодо проектування та впровадження систем акустико-емісійного контролю, діагностування та моніторингу об'єктів підвищеної небезпеки*. ТК-78, Київ.
5. Недосека С. А. (2007) Прогноз разрушения по данным акустической эмиссии. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **2**, 3–9.
6. Недосека А. Я., Недосека С. А., Овсиенко М. А. и др. (2016) Испытания сосудов давления международной группой специалистов. *Там же*, **3**, 3–11.
7. (2015) 68-я ежегодная ассамблея международного института сварки IIW 2015. Хельсинки, Финляндия. *Там же*, **4**, 58.
8. Недосека С. А. (1998) Причины возникновения повреждений и остаточный ресурс материала аварийного участка трубопровода Дашава–Киев. *Там же*, **1**, 38–49.
9. Недосека С. А., Недосека А. Я. (2010) Комплексная оценка поврежденности и остаточного ресурса металлов с эксплуатационной наработкой. *Там же*, **1**, 9–16.
10. Васильев О. С., Грузд А. А., Йолкин А. О. та ін. (2012) 10-річний досвід впровадження безперервного акустико-емісійного моніторингу сховищ аміаку Одеського припортового заводу. *Хімічна промисловість України*, **3**, 43–52.
11. Патон Б. Е., Лобанов Л. М., Недосека А. Я. и др. (2012) Опыт ИЭС им. Е. О. Патона в области акустико-эмиссионного контроля. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **1**, 7–22.
12. Патон Б. Е., Лобанов Л. М., Недосека А. Я. и др. (2014) О применении АЭ технологии при непрерывном мониторинге трубопроводов энергетических комплексов, работающих при высокой температуре. *Там же*, **3**, 7–14.
10. Vasyliiev, O.S., Gruzd, A.A., Jolkin, A.O. et al. (2012) Ten years of experience of implementation of continuous acoustic emission monitoring of ammonia storages of Odessa Port Plant. *Khimichna Promyslovist Ukrainu*, **3**, 43–52 [in Ukrainian].
11. Paton, B.E., Lobanov, L.M., Nedoseka, A.Ya. et al. (2012) Experience of the E.O.Paton Institute of the NAS of Ukraine in the field of acoustic-emission monitoring. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **1**, 7–22 [in Russian].
12. Paton, B.E., Lobanov, L.M., Nedoseka, A.Ya. et al. (2014) On application of AE technology at continuous monitoring of piping of power units operating at high temperature. *Ibid.*, **3**, 7–14 [in Russian].

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ АКУСТИКО-ЕМІСІЙНОГО КОНТРОЛЮ ПРИ ОЦІНЦІ СТАНУ ПОСУДИН ХІМІЧНОГО ВИРОБНИЦТВА

А. Я. НЕДОСЕКА, С. А. НЕДОСЕКА, М. А. ЯРЕМЕНКО,  
М. А. ОВСІЄНКО

ІЕЗ ім. С. О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Розглянуто результати проведених випробувань методом акустичної емісії реактора типу 103-D, що застосовується у виробництві аміаку, в процесі експлуатації. Показано, що в посудині на момент випробувань формуються області з концентрацією дефектів. Відзначено, що в подальшому ці області можуть накопичувати дефекти, що розвиваються і будуть представляти певну небезпеку, яка класифікується шкалою прогнозного алгоритму випробувальної апаратури, у зв'язку з чим для таких конструкцій рекомендується безперервний моніторинг і періодична оцінка ресурсу. Бібліогр. 12, табл. 1, рис. 9.

Ключові слова: акустична емісія, реактор 103-D, дефекти, безперервний моніторинг, ресурс

APPLICATION OF THE TECHNOLOGY OF ACOUSTIC EMISSION MONITORING AT EVALUATION OF THE CONDITION OF VESSELS IN CHEMICAL PRODUCTION

A. YA. NEDOSEKA, S. A. NEDOSEKA,  
M. A. YAREMENKO, M. A. OVSIENKO

E.O.Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine  
11 Kazimir Malevich str., 03150, Kiev.  
E-mail: office@paton.kiev.ua

The paper deals with the results of in-service testing conducted by acoustic emission method of 103-D type reactor, applied in ammonia production. It is shown that areas with defect concentration have formed in the vessel by the moment of testing. It is noted that further these areas can accumulate propagating defects, which will present a certain hazard, classified by the scale of predictive algorithm of the testing equipment. In view of that continuous monitoring and periodical evaluation of residual life are recommended for such structures. 12 References, 1 Table, 9 Figures.

Keywords: acoustic emission, 103-D reactor, propagating defects, continuous monitoring, residual life

Поступила в редакцію  
10.01.2018

## СПОСОБ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ БЕЗ «МЕРТВОЙ» ЗОНЫ

С. Ю. ПЛЕСНЕЦОВ, Г. М. СУЧКОВ

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт». 61002, г. Харьков, ул. Кирпичева, 2.  
E-mail: hpi.suchkov@gmail.com, s.plesnetsov@gmail.com

Разработан способ обнаружения поверхностных, приповерхностных и подповерхностных дефектов в металлоизделиях в слое толщиной до 30...50 мм. Для его реализации использован комбинированный электромагнитно-акустический преобразователь, одна часть которого излучает импульсы объемных волн, а вторая – принимает поверхностные и объемные волны. Экспериментальные исследования метода и преобразователя подтвердили высокую эффективность выявления дефектов в поверхностном слое. Амплитуда принятых эхосигналов относительно уровня шума достигала 54 дБ. Метод и преобразователи могут применяться при дефектоскопии практически любых металлоизделий в ручном и автоматическом режимах. Библиогр. 10, рис. 3.

*Ключевые слова:* дефект, электромагнитно-акустический преобразователь, ультразвуковые волны, импульс, поверхностные волны, дифракция, трансформация

В настоящее время происходит постоянное усложнение технологий производства изделий [1–4], что требует, в свою очередь, существенного улучшения характеристик средств контроля их качества. Традиционный ультразвуковой контроль не всегда обеспечивает высокую надежность выявления дефектов. Продолжает интенсивно развиваться электромагнитно-акустический (ЭМА) способ контроля металлоизделий [5–8], который имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными ультразвуковыми методами диагностики.

Одной из сложных проблем, как для традиционного, так и для ЭМА контроля является выявление дефектов в поверхностных и приповерхностных слоях металлоизделий. Это обусловлено наличием определенной длительности зондирующего импульса и следующих за ним импульсов переходных процессов в ультразвуковом преобразователе и блоках дефектоскопа. Решить эту проблему путем сокращения длительности зондирующих импульсов и длительности переходных процессов в полной мере не удалось.

Целью работы является разработка метода и преобразователей для бесконтактного электромагнитно-акустического ультразвукового контроля поверхностных слоев металлоизделий без «мертвой» зоны.

**Содержание, анализ исследований и разработки.** Одним из существенных преимуществ ЭМА способа является отсутствие необходимости использования контактной жидкости. Это дает возможность принципиальным образом решить проблему наличия «мертвой» зоны.

Известно, что при взаимодействии ультразвуковых волн с дефектом в виде трещин, неметал-

лических включений, газовых пузырей и тому подобных, происходит их дифракция и трансформация. Поскольку дефект располагается возле поверхности изделия, то ультразвуковые импульсы, «переизлученные» дефектом (рис. 1), падают на поверхность ввода в виде сдвиговых  $C_i$  (или) продольных  $C_l$  волн, которые в свою очередь на границе изделия трансформируются в поверхностные волны  $C_r$  (рис.1, а). На рис. 1:  $B_z$  – поляризуемая индукция магнитного поля,  $H_z$  – напряженность переменного высокочастотного магнитного поля.  $B_z$  и  $H_z$  формируются возбуждающим ЭМА преобразователем (ЭМАП). В силу отсутствия на поверхности объекта контроля (ОК) жидкости, поверхностные волны распространяются от дефекта в разные стороны, и легко обнаруживаются приемным ЭМАП на больших расстояниях. При этом частота заполнения импульсов принимаемых поверхностных волн соответствует частоте возбуждаемых импульсов. Длительность принимаемых импульсов может увеличиваться, что, при прочих равных условиях, позволяет лучше выделять их на фоне помех и шумов. Экспериментальные исследования описанных физических процессов позволили установить, что величина амплитуды сигнала, принятого на расстоянии, по отношению к шуму (в зависимости от состояния поверхности ОК) может достигать 30 дБ и более.

При наличии в ОК дефектов, выходящих на поверхность (рис. 1, б), возбуждение поверхностных волн происходит непосредственно на кромке трещины. Как показали экспериментальные исследования, при контроле ферромагнитных изделий за счет повышенного значения индукции поляризуемого магнитного поля на кромке трещины амплитуда принимаемой поверхностной

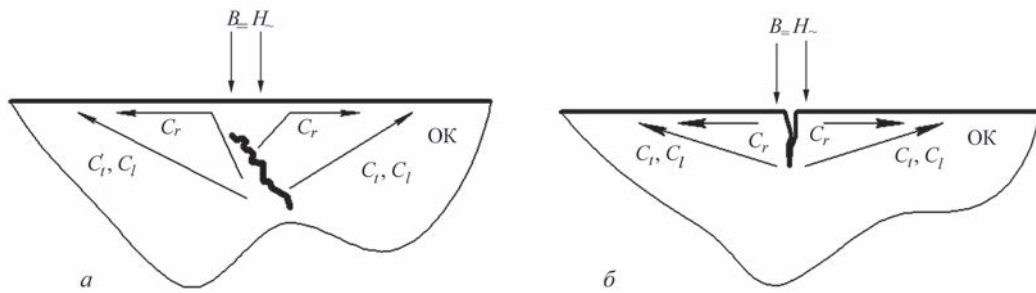


Рис. 1. Принцип ЭМА обнаружения дефектов в поверхностных слоях металлоизделий

волны относительно уровня шума может превышать 40 дБ.

Аналогичный процесс возбуждения поверхностных волн реализуется при наличии дефектов на внутренней поверхности оболочек, труб и пластин толщиной 30...50 мм.

В описанном методе контроля возбуждающий и приемный ЭМА преобразователи изготавливаются отдельно. Соответственно, согласование возбуждающего преобразователя с выходом генератора зондирующих импульсов и приемного преобразователя с входом усилителя можно оптимизировать. Исключается воздействие мощного зондирующего импульса на вход усилителя полезного сигнала.

Процесс контроля с использованием разработанного способа может быть следующим. На изделие устанавливается приемный ЭМАП для фиксации поверхностных волн. Второй ЭМАП сканирует изделие, возбуждая, например, объемные сдвиговые колебания нормально контролируемой поверхности участка. При попадании в зону возбуждаемого акустического поля поверхностных или подповерхностных дефектов приемный ЭМАП зафиксирует импульсы поверхностных волн. Амплитуда принятых импульсов будет зависеть от размеров обнаруженного дефекта, его ориентации относительно возбужденного акустического поля, материала, из которого состоит дефект, состояния поверхности ОК. При наличии тонких вытянутых трещин наиболее мощная поверхностная волна возбуждается перпендикулярно наибольшей плоскости ее развития. Следовательно, разработанный способ позволяет дополнительно определять форму обнаруженного дефекта путем перемещения приемного ЭМАП вокруг возбуждающего преобразователя.

Очевидно, что возбуждающий и приемный преобразователи можно объединить в одно устройство. При этом создаются одинаковые условия для оценки размеров дефектов, и облегчается возможность использования такого тандема в автоматических установках диагностики. Одновременно можно фиксировать внутренние дефекты, располагающиеся на больших расстояниях, прямым совмещенным преобразователем по тра-

диционной методике или одновременно измерять толщину изделия. При таком подходе производительность и объем контроля возрастают.

При экспериментальных исследованиях обнаружен и обратный эффект. Если возбудить поверхностную волну и принимать ее также, как поверхностную волну, то при попадании приемного ЭМАП на поверхностный дефект принимаемая амплитуда сигнала резко возрастает. Это приращение принимаемой амплитуды зависит от характеристик дефекта и достигает 10...30 дБ. Использование этого метода контроля может существенно увеличить чувствительность диагностики поверхностными волнами.

Таким образом, разработанный способ ЭМА диагностики позволяет исключить «мертвую» зону, увеличить чувствительность контроля и достоверность обнаружения дефектов. Также повышается производительность контроля. Для реализации предложенного способа разработаны ЭМАП для контроля изделий с различной формой поверхности. Для примера, на рис. 2 приведена схема раздельно совмещенного преобразователя для дефектоскопии плоских изделий.

На рис. 2 обозначены элементы ЭМАП: 1 – корпус; 2 – первый источник постоянного поляризуемого магнитного поля; 3 – второй источник поляризуемого постоянного магнитного поля; 4 – принимающая высокочастотная катушка индуктивности с рабочей 6 и нерабочей 8 участками; 5 – возбуждающая высокочастотная катушка индуктивности с рабочим 7 и нерабочим 9 участками; принимающая высокочастотная катушка 4 индуктивности размещена в неэлектропроводной неферромагнитной основе 10; возбуждающая высокочастотная катушка 5 индуктивности размещена в неэлектропроводной неферромагнитной основе 11; 12 – протектор; 13 и 14 – соединители; 15 и 16 – соединительные проводники; ОК – объект контроля.

ЭМАП функционирует следующим образом. Преобразователь, который имеет корпус 1, располагают на поверхности ОК так, как показано на рис. 2, чтобы протектор 12 прилегал к поверхности ОК, защищая элементы ЭМАП от повреждения. Источник 2 поляризуемого магнитного поля

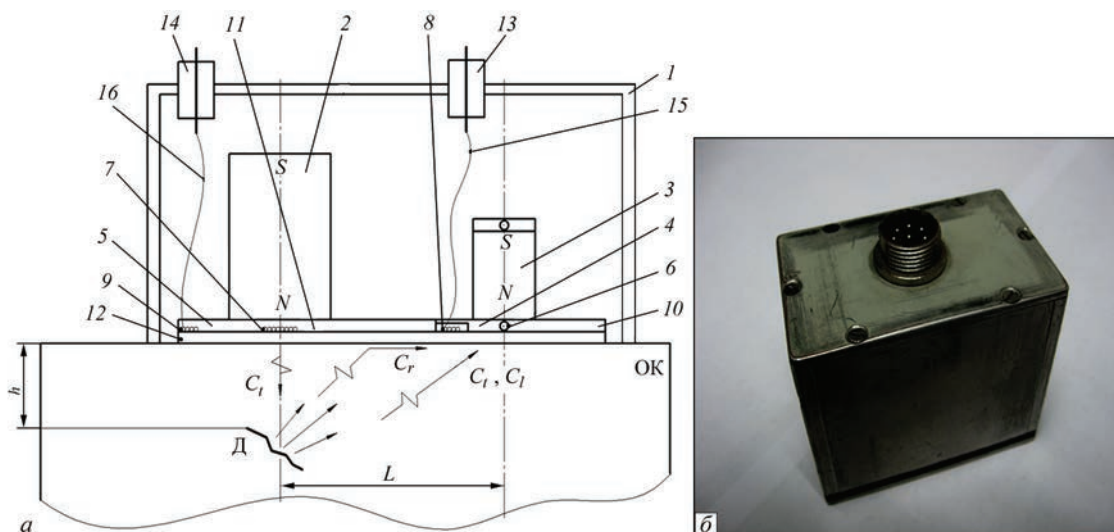


Рис. 2. Схема ЭМАП для контроля поверхностного слоя плоских ферромагнитных изделий (а) и общий вид прибора (б) (1–16 – см. в тексте)

создает в поверхностном слое ферромагнитного ОК магнитное поле, силовые линии которого направлены нормально к его поверхности. Импульсы высокочастотного тока питают высокочастотную катушку 5 через разъем 14 и проводник 16. Катушка 5 генерирует электромагнитное поле. Взаимодействие электромагнитного поля и магнитного поля в поверхностном слое ОК проходит только под полюсом источника 2 постоянного поляризующего магнитного поля, где расположен рабочий участок 7 высокочастотной катушки 5, и не проходит над нерабочим участком 9 высокочастотной катушки 5. В результате в ОК возбуждается акустическое поле импульсов поперечных волн, которые распространяются преимущественно нормально к поверхности вглубь изделия со скоростью  $C_r$ . Основа 10 изготовлена из неэлектропроводных и неферромагнитных материалов и необходима для фиксации высокочастотных катушек 4 и 5. В образце ЭМАП, показанном на рис. 2, б, соединительный разъем выполнен общим.

Если в зоне возбужденного акустического поля на глубине  $h$  будет находиться дефект Д, то, за счет дифракции и трансформации на его поверхности будут возбуждены волны различных типов. В результате в поверхностном слое металла ОК под полюсом второго источника 3 поляризующего постоянного магнитного поля могут появиться три типа волн: поверхностная (Рэлея) со скоростью распространения  $C_r$ , поперечная со скоростью распространения  $C_p$ , продольная со скоростью распространения  $C_l$ . Взаимодействие указанных волн с магнитным полем второго источника 3 возбудит над поверхностью металла ОК электромагнитное поле. Это поле наведет ЭДС в рабочей области 6 принимающей высокочастотной катушки 4 индуктивности и не наведет ЭДС в нерабочей области 8 принимающей высокочастотной катушки 4 индуктивности.

Выполнение рабочего участка 6 принимающей высокочастотной катушки индуктивности 4 в виде плотно упакованных проводников общим размером меньше длины полуволны акустических колебаний, которые должны возбуждаться в металлоизделии, гарантирует прием сигналов разных типов волн с максимальной амплитудой. Принятый импульс, который несет информацию о наличии дефекта Д и его характеристики, через проводник 15 поступает на соединитель 13. Расстояние  $L$  между рабочим участком 7 возбуждающей высокочастотной катушки индуктивности 5 и рабочим участком 6 принимающей высокочастотной катушки индуктивности 4 определяется из условия разнесения во времени зондирующего и принятого эхоимпульсов. Расчет величины  $L$  следует выполнять с учетом скоростей распространения ультразвуковых волн разных типов в материалах, подлежащих контролю. В ЭМАП по рис. 2, б  $L = 42$  мм.

При таком установлении величины  $L$  импульс, который несет информацию о дефекте Д, появляется на временной развертке после окончания переходных процессов в элементах дефектоскопа и будет обязательно зарегистрирован прибором контроля, независимо от того, находится дефект на поверхности ОК или на некоторой глубине.

При контроле ОК с криволинейной поверхностью возбуждающие и принимающие части раздельно совмещенного преобразователя соединяются с помощью подвижного шарнира.

Экспериментальные исследования преобразователей, которые реализуют разработанный метод контроля, позволили установить следующее.

На образцах обсадной трубы диаметром 168 мм и толщиной стенки 10,4 мм (сталь по ГОСТ 632-80) с моделями дефектов в виде пазов различной глубины, длины и раскрытия, распо-

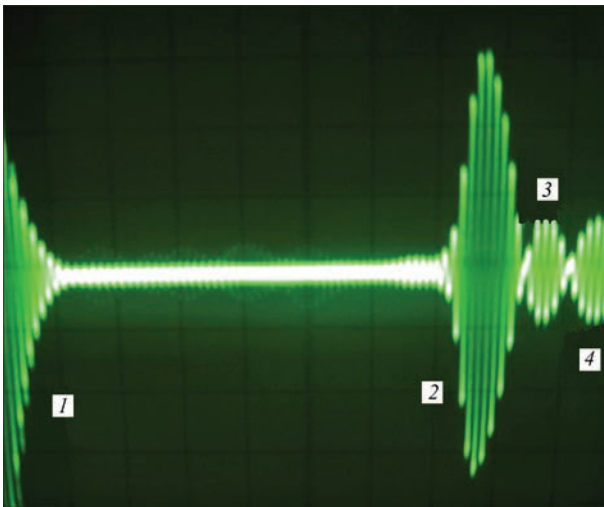


Рис. 3. Временная развертка эхосигнала от дефекта в виде паза на поверхности катания железнодорожного рельса глубиной 0,2 мм, раскрытием 0,2 мм и длиной 16 мм (1–4 – см. в тексте)

ложенных на наружной и внутренней сторонах, и сверлений амплитуда принятого сигнала поверхностной волны находилась в интервале 8...53 дБ. На чугунной гильзе для двигателей грузовиков диаметром 132 мм и толщиной стенки 7 мм с продольным пазом на наружной поверхности длиной 28 мм, раскрытием 0,15 мм и глубиной 0,3 мм амплитуда импульса составляла 9,4 дБ. На трубах из Ст3, Ст45 и легированной стали диаметром 51,3; 32; 28; 24 и 17 мм, с толщинами стенок 1; 2; 2,5; 3,5 и 6,3 мм и моделями дефектов глубиной 0,2...0,4 мм, а также с натуральными трещинами различных размеров амплитуда полезного сигнала находилась в интервале 5,7...54 дБ. Экспериментальные исследования проводились по поверхности без применения зачистки на частотах 2,3...4,8 МГц. ЭМА преобразователи использованы совместно с оборудованием, описанным в работах [9, 10].

Аналогичные результаты исследований получены на различных участках образцов из рельсов. Для примера на рис. 3 приведена реализация, полученная ЭМАП на образце рельса R65.

На рис. 3 обозначены: 1 – зондирующий импульс; 2 – эхосигнал поверхностной волны от дефекта в виде пропила поперек рельса; 3 и 4 – сигналы объемных волн. Преобразователем возбуждались сдвиговые волны импульсом с частотой заполнения 2,3 МГц, длительностью, равной 4 периодам частоты заполнения. Пиковый ток в индукторе ЭМАП достигал 80 А. Зазор между преобразователем и металлом составлял 0,5 мм. Поверхность образца не зачищалась.

### Выводы

Разработан способ, который позволяет обнаруживать дефекты металлоизделий ЭМА преобразо-

вателями на глубинах от 0 до 30...50 мм на частотах до 5 МГц.

Применение разработанного способа дефектоскопии изделий дает возможность уверенно обнаруживать эхометодом продольные и поперечные дефекты на наружной и внутренней поверхностях труб, а также внутренние дефекты в стенках труб, в листах при доступе с одной из сторон. С высокой степенью надежности определяются дефекты типа трещин, представляющие особую опасность при эксплуатации. Обнаружены дефекты с раскрытием менее 0,1 мм и глубиной более 0,2 мм.

Показано, что трубы диаметром 17 мм и более, а также листы толщиной до 30 мм можно контролировать одним раздельно совмещенным преобразователем.

Установлено, что при обнаружении дефектов и измерении их параметров метод позволяет одновременно измерять толщину изделия прямым ЭМАП.

### Список литературы / References

1. Dragobetskii, V. V., Shapoval, A. A., Zagoryanskii, V. G. (2015) Development of Elements of Personal Protective Equipment of New Generation on the Basis of Layered Metal Compositions. *Steel in Translation*, **45**, 1, 33–37.
  2. Dragobetskii, V. V., Shapoval, A. A., Mospan, D. V. et al. (2015) Excavator Bucket Teeth Strengthening Using a Plastic Explosive Deformation. *Metallurgical and Mining Industry*, **4**, 363–368.
  3. Shapoval, A. A., Mospan, D. V. & Dragobetskii, V. V. (2016) Ensuring High Performance Characteristics for Explosion-Welded Bimetals. *Metallurgist*, **60**, 3, 313–317.
  4. Gorbatyuk, S. M., Shapoval, A. A., Mospan, D. V., Dragobetskii V. V. (2016) Production of Periodic Bars by Vibrational Drawing. *Steel in Translation*, **46**, 7, 474–478.
  5. Zenghua, L. A., L. Zenghua, W. Bin et al. (2007) New Type Transducer for Torsional Guided Wave Generation and Its Application to Defect Detection in Pipes. *Insight*, **49**(1), 41–43.
  6. R. P. Migushchenko, G. M. Suchkov, O. N. Petrishchev, V. F. Bolyukh, S. Yu. Plesnetsov, A. I. Kocherga. (2017) information-measuring electromechanical transducers for assessing the quality of the surface of ferromagnetic metal items by ultrasonic waves Rayleigh. *Tekhnichna elektrodynamic*, **2**, 79–88. [in Russian]
  7. S.Yu. Plesnetsov, O.N. Petrishchev, R.P. Migushchenko, G.M. Suchkov. (2017) Modeling of electromagnetic-acoustic conversion when excited torsional waves. *Ibid*, **3**, 79–88. [in Russian]
  8. Tolipov, K. B. (2017) Possibilities for Increasing the Efficiency of Contactless Emitters of Acoustic Waves. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, **53**, 4, 304–307.
  9. Suchkov, G. M., Petrishchev O. N., Cherednichenko I. V. et al. (2012) A Generator of Probing Pulses for EMA Flaw Detectors. *Ibid*, **48**, 9, 537–540.
  10. Мигушченко Р. П., Сучков Г. М., Петрищев О. Н., Десятниченко А. В. (2016) Теория и практика электромагнитно-акустического контроля. Часть 5. Особенности конструирования и практического применения ЭМА устройств ультразвукового контроля металлоизделий. Харьков, ООО «Планета-принт».
- Migushchenko, R.P., Suchkov, G.M., Petrishchev, O.N., Desyatnichenko, A.V. (2016) *Theory and practice of electromagnetic-acoustic monitoring. Pt 5: Peculiarities of design and practical application of ultrasonic testing EMA systems of metal products*. Kharkov, Planeta-print [in Russian].

СПОСІБ ЕЛЕКТРОМАГНІТНО-АКУСТИЧНОГО КОНТРО-  
ЛЮ МЕТАЛОВИРОБІВ БЕЗ «МЕРТВОЇ» ЗОНИ

С. Ю. ПЛЕСНЕЦОВ, Г. М. СУЧКОВ

Національний технічний університет «Харківський політех-  
нічний інститут». 61002, м. Харків, вул. Кирпичева, 2.  
E-mail: hpi.suchkov@gmail.com, s.plesnetsov@gmail.com

Розроблено спосіб виявлення поверхневих, приповерхневих і підповерхневих дефектів в металовиробах в шарі товщиною до 30...50 мм. Для його реалізації використано комбінований електромагнітно-акустичний перетворювач, одна частина якого випромінює імпульси об'ємних хвиль, а друга – приймає поверхневі і об'ємні хвилі. Експериментальні дослідження методу і перетворювача підтвердили високу ефективність виявлення дефектів в поверхневому шарі. Амплітуда прийнятих ехосигналів щодо рівня шуму досягала 54 дБ. Метод і перетворювачі можуть застосовуватися при дефектоскопії практично будь-яких металовиробів в ручному і автоматичному режимах. Бібліогр. 10, рис. 3.

Ключові слова: дефект, електромагнітно-акустичний перетворювач, ультразвукові хвилі, імпульс, поверхневі хвилі, дифракція, трансформація

METHOD OF ELECTROMAGNETIC-ACOUSTIC  
MONITORING OF METAL PRODUCTS WITHOUT THE  
«DEAD ZONE»

S. Yu. PLESNETSOV, G. M. SUCHKOV

National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute»,  
2 Kirpicheva str., 61002, Kharkov.  
E-mail: hpi.suchkov@gmail.com

A method of detection of surface, near-surface and subsurface defects in metal items in a layer up to 30 – 50 mm thick was developed. It was realized with application of a combined electromagnetic-acoustic transducer, one part of which emits pulses of bulk waves, and the second receives surface and bulk waves. Experimental studies of the method and transducer confirmed the high effectiveness of defect detection in the surface layer. Amplitude of received echo-signals relative to the noise level reached 54 dB. Method and transducers can be applied at flaw detection in practically any metal products in manual and automatic mode. 10 References, 3 Figures.

Keywords: defect, electromagnetic-acoustic transducer, ultrasonic waves, pulse, surface waves, diffraction, transformation

Поступила в редакцію

0 8

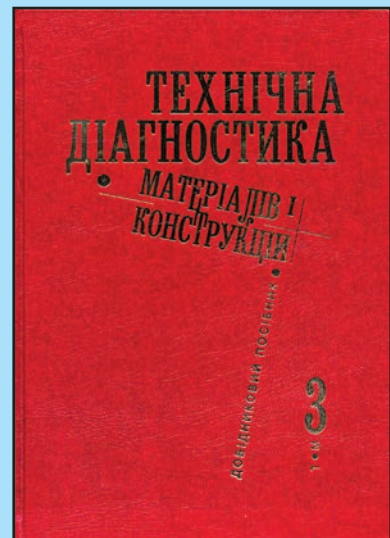
НОВА КНИГА

**Технічна діагностика матеріалів і конструкцій: У 8-ми томах. Том. 3  
МОНІТОРИНГ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ З ВИКОРИ-  
СТАННЯМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ ОПТИЧНОГО ДІАПАЗОНУ.**

*Л. М. Лобанов, Л. І. Муравський, В. А. Півторак, Т.І. Вороняк.* – Львів: «Простір-М», 2017. – 340 с.

Проаналізовано оптичні та оптико-цифрові методи моніторингу напруженого стану елементів конструкцій, які охоплюють фазозсувну інтерферометрію, електронну спеклінтерферометрію, електронну ширографію та цифрову спекл-кореляцію. Описано нові інтерферометричні технології виділення тривимірних рельєфів шорсткості та хвилястості поверхні, розрахунку розмірів втомної зони передруйнування біля концентраторів напружень, прогнозування місця старту втомної макротріщини, визначення залишкових напружень для оцінювання напруженого стану елементів конструкцій, побудови тривимірних полів переміщень поверхні та виявлення прихованих дефектів у металевих і композитних зразках. Подано результати ширографічного контролю якості різних типів металевих та композитних конструкцій, а також точкових зварних з'єднань. Нові спекл-кореляційні технології отримання компонентів поля напружень біля тріщини використано для визначення кута старту тріщини та оцінки критичних коефіцієнтів інтенсивності напружень під час квазікрихкого руйнування.

Для наукових працівників та інженерів, які працюють у галузі технічної діагностики та неруйнівного контролю елементів конструкцій і матеріалів оптичними та оптоелектронними методами і засобами.



# КОНТРОЛЬ І ОЦІНКА ТЕХНІЧНОГО СТАНУ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД ШАХТНОЇ ПОВЕРХНІ

В. А. КУЛІШ, Е. С. КРИЛОВ

ДП «Інститут «УкрНДІпроект» Мінералогічного Інституту України, 03142, м. Київ, просп. Академіка Палладіна, 46/2.

E-mail: [post.upn@ukr.net](mailto:post.upn@ukr.net)

Розглянуто ряд галузевих нормативно-технічних документів, які регламентують процедуру контролю і оцінки технічного стану металевих конструкцій будівель і споруд шахтної поверхні в процесі їх обстеження і паспортизації. Вони відповідають вимогам діючих законодавчих і нормативних документів та сприяють підвищенню безпеки і надійності експлуатації будівель і споруд шахтної поверхні за рахунок своєчасного одержання інформації про їх фактичний технічний стан. Бібліогр. 13, табл. 2.

*Ключові слова:* контроль, оцінка, технічний стан, металева конструкція, будівля, споруда, шахтна поверхня, надійність, безпека

Більшість будівель і споруд шахтної поверхні (БШП) вугільних підприємств експлуатуються з вичерпаним нормативним терміном служби, тому є небезпечними і вимагають систематичного контролю їх технічного стану.

Конструктивною особливістю цих об'єктів є те, що основні несучі будівельні конструкції є металевими і складають 50...70 % маси устаткування. При цьому безпека руйнування їх значно вища ніж механізмів і тому головним фактором надійності і безпеки є технічний стан металевих конструкцій (МК).

Несучі МК мають клепаано-зварну або болтову конструкцію, яка виготовлена з низьколегованих сталей вітчизняного виробництва 10ХСНД, 15ХСНД, 09Г2, або їх зарубіжних аналогів, а їх технічний стан визначається наявністю і характеристиками дефектів і пошкоджень технічного і експлуатаційного походження.

Згідно зі статистикою серед виробничих причин руйнувань (аварій) зварних конструкцій близько 42 % складають дефекти виготовлення і монтажу; за технічних причин до 27 % аварій відбувається за рахунок руйнування зварних і болтових (клепаних) з'єднань.

Технічний стан БШП визначається в процесі їх оглядів, інструментальних обстежень та паспортизації, які являють собою комплекс заходів з виявлення дефектів і ушкоджень несучих і огорожувальних конструкцій, оцінки технічного стану і визначення їх працездатності [1, 2].

Зараз проектування будівельних конструкцій виконується з використанням методу розрахунку за граничним станом. В зв'язку з цим при обстеженні об'єктів БШП до конструкцій висувають вимоги відповідності групам граничних станів: першої групи за несучою здатністю, і другої – за

придатністю до нормальної експлуатації відповідно до чинних нормативних документів на проектування [3–7].

В процесі обстеження МК об'єктів БШП в першу чергу виявляються дефекти і пошкодження в місцях концентрації напружень металевих ферм і балок з урахуванням ступеню їх небезпеки.

В табл. 1 наведено характерні дефекти і пошкодження МК, для яких визначено:

- гранично припустимі значення параметрів дефектів при працездатному технічному стані;
- метод контролю та нормативні документи по яких він здійснюється;
- категорія небезпечності за ДБН 362.

До категорії А відносяться дефекти і пошкодження, що становлять безпосередню небезпеку руйнування.

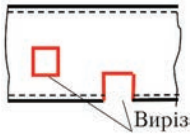

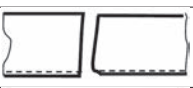


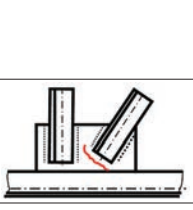
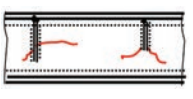
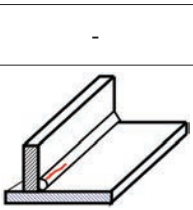
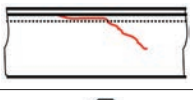
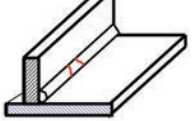
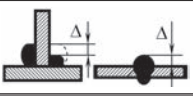
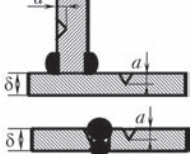
До категорії Б відносяться дефекти і пошкодження, що не становлять безпосередньої небезпеки для конструкцій, але можуть надалі спричинити пошкодження інших елементів (вузлів, з'єднань) і становити категорію А.

До категорії В відносяться дефекти і пошкодження, що не відносяться до категорій А і Б та наявність яких не пов'язана з загрозою руйнування. В табл. 2 наведені рекомендації щодо використання сучасних методів неруйнівного контролю для інструментальних обстежень об'єктів БШП.

За результатами обстежень виконується розрахункова оцінка і паспортизація технічного стану МК. Перевірний розрахунок конструкцій виконується з урахуванням виявлених при обстеженні дефектів і пошкоджень за СНіП II-23-81\*, а облік впливу дефектів і пошкоджень відповідно до вказівок п.п.3.12-3.22 цих норм.

Шляхом спільного аналізу дефектів і пошкоджень, а також результатів перевірок розрахунків

Таблиця 1. Класифікація дефектів і пошкоджень несучих металоконструкцій\*

Ескіз дефекту	Назва дефекту	Гранично припустимі значення параметрів дефектів при працездатному стані	Метод контролю і нормативні документи	Категорія небезпечності за ДБН 362.92
1	2	3	4	5
	Виріз в елементі	Перевіряється розрахунком	Візуально-оптичний ДСТУ ISO 17637, ДСТУ EN 13018, ДСТУ EN 13927	А
	Вирив в елементі	Теж	Теж	Б
	Відсутність елемента	Не припустимо	—“—	А
	Розрив елемента	Теж	—“—	А
	Пропалений отвір в елементі	Перевіряється розрахунком	—“—	Б
	Тріщина в основному металі елемента	Не припустимо	Візуально-оптичний, ультразвуковий, магніто-порошковий, капілярний, акустико-емісійний ДСТУ ISO 17637, ДСТУ EN 13018, ГОСТ 12503, ГОСТ 14782, ГОСТ 21105, ДСТУ EN 1369, ГОСТ 18442, ГОСТ 20415	А
	Тріщина у фасонці	Теж	Теж	А
	Тріщини в стінці балки під ребром жорсткості або від ребра жорсткості	—“—	—“—	А
-	Інші тріщини в стінці балки	—“—	—“—	А
	Повздовжня тріщина в зварному шві	—“—	—“—	А
	Подовжня тріщина в зварному шві з виходом на основний метал	—“—	—“—	А
	Поперечна тріщина в зварному шві	—“—	—“—	А
	Неповномірність швів при зварюванні	Перевіряється розрахунком	Візуально-оптичний ДСТУ ISO 17637, ДСТУ EN 13018, ДСТУ EN 13927	Б
	Підрізи основного металу	$a \leq 0,5 \text{ мм}$ $a \leq 0,03\delta$	Візуально-оптичний, ультразвуковий 17637, ДСТУ EN 13018, ГОСТ 12503, ГОСТ 14782	Б



1	2	3	4	5
	Непровар в корені шва	$\left. \begin{aligned} a &\leq 0,05 \\ a &\leq 2\text{мм} \end{aligned} \right\}$ $L_{\text{вд}} \leq 50 \text{ мм}$ $a \leq 0,15\delta$ $a \leq 3 \text{ мм}$	Ультразвуковий, радіографічний ГОСТ 12503, ГОСТ 14782, ГОСТ 7512, ГОСТ 23055	Б
	Окремі шлакові включення або пори	$a \leq 1 \text{ мм}$ $a \leq 3 \text{ мм}$	Теж	В
—	Шлакові включення, розташовані ланцюгом або суцільною лінією вздовж шва	Сумарна довжина до 200 мм на 1 м шва	—	Б
—	Скупчення газових пор або шлакових включень в окремих ділянках шва	Не більше ніж 5 шт. На 1 см <sup>2</sup> площі шва при діаметрі одного дефекту не більше ніж 1,5 мм	—	Б
—	Непровари, шлакові включення і пори, розташовані окремо або ланцюжком	Не більше 10 % товщини металу і не більше ніж 2 мм. Не більше ніж 15 % товщини металу і не більше ніж 3 мм	—	Б
—	Відсутність заклепування або прогонів	Не припустимо	Ультразвуковий, радіографічний ГОСТ 12503, ГОСТ 14782, ГОСТ 7512, ГОСТ 23055	Б
—	Провертання прогонів або заклепування	Теж	—	Б
—	Відрив головки заклепування або прогону	Не припустимо	—	А
	Косе заклепування	$a \leq 0,03 H$ $a \leq 3 \text{ мм}$	—	В
	Витягнуте заклепування	Не припустимо	—	Б
—	Відсутність проектного натягу високоміцних прогоничів	До 20 % величини припустимого відхилення по крутильному моменту	Метод контролю напружено-деформованого стану металу	А
—	Зріз заклепування або прогонича	Не припустимо	Візуально-оптичний ДСТУ ISO 17637, ДСТУ EN 13018, ДСТУ EN 13927	А
	Загальна поверхнева рівномірна корозія	Перевіряється розрахунком. Втрата перерізу елемента МК – не більше ніж 30...40 %	Візуально-оптичний ДСТУ ISO 17637, ДСТУ EN 13018, ДСТУ EN 13927	—
	Загальна нерівномірна корозія	Теж	Теж	—
	Місцева корозія (корозія плямами)	—	—	—

Примітка. \*Типові, найбільш розповсюджені.

Таблиця 2. Вибір методів неруйнівного контролю несучих МК для інструментальних об'єктів БШП

Методи і засоби контролю	Чутливість	Основні види з'єднань і дефектів										Діапазон температур контролю	Стан поверхні контролю	Основні нормативні документи
		Основний метал		Заклепачі			Зварні		Тріщини	Тріщини	Тріщини			
		Розшарування	Тріщини	Тріщини в місцях накладок	Неповне ушліщення отвору	Не провар, пори, раковини	Підрізи							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
<p><b>1. Візуально-оптичний</b> Комплект луп КЛП-5 з підсвіткою. Комплекс № 1 для візуального контролю. Бінокль 5ПЦ7×50. Труба оптична ЗРТ-457. Бороскопи, флексоскопи, відеоендоскопи серій XLPPO, XLG3, Long Steer, Video Probe, Теодоліт 2Т30, 2Т30П</p>	Тріщина: ширина розкриття 0,01 мм, довжина 0,1 мм	+	які виходять на поверхню	які виходять на поверхню	-	±	+	які виходять на поверхню	без обмежень, для деяких ендоскопів від 5°C до 50°C	зачищена або з захисним покриттям	-			
<p><b>2. Ультразвуковий</b> Дефектоскопи: УД2-70, серія DFX, Einstein-II, серії USM, USN, Товщиноміри: ЕУЗ-1, ТУЗ-2, серії ММХ, УМХ, МХ</p>	Дефекти площею > 1 мм <sup>2</sup>	+	+	+	метод обстукування	+	+	±	від 5°C до 50°C	зачищена	ГОСТ 12503, ГОСТ 14782			
<p><b>3. Радіографічний</b> Портативні рентгенівські апарати серій SITE-X, РАТМІР-160, РАТМІР-190.</p>	Тріщини шириною 0,1 мм, пори, непровари розміром > 0,5 мм	-	±	±	±	+	-	±	від -20°C до 40°C	зачищений покриттям	ГОСТ 7512, ГОСТ 23055			
<p><b>4. Магніторозшукний</b> Магнітні дефектоскопи DA750, DA1500. Портативні потужнострумкові генератори Portaflux4000. Намагнічувачний пристрій РМ-50. УФ опромінювачі СН-50Р/12, FC-100, УУ-4В, Е/12. Магнітна суспензія MR-76F, MR-158, MR-210. Комплекс для магніторозшукної дефектоскопії (MR-76, MR-722K, MR-71)</p>	Дефекти шириною 25 мкм і довжиною > 0,5 мм	+	які виходять на поверхню	які виходять на поверхню	-	які виходять на поверхню	-	+	від -30°C до 50°C	зачищена	ГОСТ 21105			
<p><b>5. Капілярний (кольоровий)</b> Комплекс OVER-CHEK для капілярного контролю. Комплекс для кольорової дефектоскопії (MR-68С, MR-88, MR-70)</p>	Тріщини шириною > 10 мкм, глибиною 100 мкм і довжиною 1 мм	+	які виходять на поверхню	які виходять на поверхню	-	-	-	+	від 8°C до 40°C		ГОСТ 18442			
<p><b>6. Акустико-емісійний</b> АЕ прилад серії «ЭМА» АЕ комплекс А-Line32D. АЕ система AMSY-5. АЕ комплекс KARAT. АЕ комплекс «КОМПАС»</p>	Пріріст тріщини на 1...10 мкм	-	+	±	-	-	-	+	від -40°C до 50°C		ГОСТ 20415, ГОСТ 4227, СОУ 10.1.00174125.006: 2005			

Примітка. Знаки позначають наступне: + – широкое застосування методу; ± – обмежене застосування методу; — – метод не застосовується.

визначається технічний стан окремих конструкцій відповідно до ДСТУ – НБВ.1.2-18:2016 [8].

Технічний стан окремої будівельної конструкції характеризується однією з чотирьох категорій:

- «1» – нормальний;
- «2» – задовільний;
- «3» – непридатний до нормальної експлуатації;
- «4» – аварійний.

Технічний стан конструкції нормальний – категорія технічного стану «1»: фактичні зусилля в елементах та перерізах конструкції не перевищують допустимих за розрахунком, відсутні дефекти та пошкодження, які знижують несучу здатність та довговічність, або перешкоджають нормальної експлуатації.

Технічний стан конструкції задовільний – категорія «2»: за експлуатаційними якостями конструкція відповідає категорії технічного стану «1», але мають місце часткові відхилення від вимог проекту, дефекти або пошкодження, які можуть знизити довговічність конструкції, або частково порушити вимоги другої групи граничних станів, що в конкретних умовах експлуатації конструкції не обмежує використання об'єкта за визначеним призначенням.

Потрібні заходи захисту конструкції та дотримання встановлених вимог щодо його використання.

Технічний стан конструкції не придатний до нормальної експлуатації – категорія «3»: конструкція не відповідає категоріям технічного стану «1» та «2» щодо несучої здатності, або нормальної реалізації захисних функцій, але аналіз дефектів і пошкоджень з перевірними розрахунками виявляє можливість забезпечення її цілісності до проведення ремонту.

Необхідно виконати ремонт, підсилення або заміну конструкції, а до завершення цих заходів використовувати об'єкт за обмеженим режимом експлуатації, контролюючи стан конструкції, навантаження та впливи.

Технічний стан конструкції аварійний – категорія «4»: порушені вимоги першої групи граничних станів (або не можливо запобігти цим порушенням) та аналіз дефектів і пошкоджень з перевірними розрахунками показує неможливість гарантувати цілісність конструкції до проведення її ремонту, підсилення або заміни (особливо якщо можливий «крихкий» характер руйнування), або остаточно втрачена можливість нормальної реалізації захисних функцій конструкції.

Необхідно негайно виключити перебування людей в зоні можливого обвалення та/або вжити заходів, які унеможливають таке обвалення до проведення ремонту, підсилення чи заміни конструкції, або до ліквідації об'єкта.

Результати обстеження і оцінки технічного стану МК об'єктів БШП заносяться в паспорт техніч-

ного стану згідно з НПАОП 45.2-1.01. Паспортизація технічного стану БШП, що забезпечується їх періодичними обстеженнями силами спеціалізованих організацій, надає своєчасну інформацію для планування і здійснення ефективних заходів з підтримання надійності, безпеки та експлуатаційної придатності споруд, а за потреби виведення їх із небезпечного стану (аж до ліквідації).

Багаторічний досвід проведення обстежень об'єктів БШП в різних регіонах України, а також розробки нормативно-технічних документів для їх реалізації, дозволили ДП «Інститут «УкрНДІпроект» розробити наступні галузеві НТД [9–12].

КД12.009-95 (із змінами). Порядок і організація обстеження будівельних конструкцій, будівель і споруд шахтної поверхні.

КД12.011-96 (із змінами). Будівлі і споруди технологічних комплексів шахтної поверхні. Вимоги до експлуатації.

СОУ10.1.00174125.015:2008. Несучі металеві конструкції гірничого устаткування і гірничотехнічних споруд. Оцінка технічного стану.

СОУ-Н10.1.00174125.001:2012. Порядок і організація обстеження металевих копрів.

## Висновки

Для забезпечення надійності і безпечної експлуатації БШП в ДП «Інститут «УкрНДІпроект» розроблено ряд галузевих НТД, які регламентують процедури контролю і оцінки технічного стану металевих конструкцій в процесі їх обстеження і паспортизації, а також вимоги до їх експлуатації.

Впровадження на вугільних підприємствах рекомендацій цих документів дозволяє [13]:

- домогтися в практиці експлуатації об'єктів БШП єдиного порядку виконання і методики обстеження та паспортизації технічного стану, які відповідають вимогам діючих законодавчих і нормативних документів;

- створити на підприємствах службу спостереження за безпечною експлуатацією будівель і споруд і визначити для неї структури функцій, прав і обов'язків;

- оцінити рівень безпеки експлуатації окремих елементів і вузлів;

- виконувати ранжування обстежених конструкцій за потребою ремонтів, реконструкцій або замін;

- забезпечити відновлення початкових експлуатаційних якостей споруди в цілому і окремих її конструкцій за рахунок своєчасного проведення ремонтних робіт;

- проводити прогнозування залишкового ресурсу конструкцій та обґрунтування подовження терміну безпечної експлуатації об'єктів підвищеної небезпеки;

- визначати номенклатуру та значення показників надійності елементів конструкції з ураху-

ванням можливих видів граничних станів (відмов), що забезпечують надійність конструкції;

– визначати допуски на конструктивні, технологічні та експлуатаційні обмеження щодо забезпечення розрахункового терміну служби МК об'єктів при обслуговуванні їх за фактичним станом;

– знизити простої гірничого устаткування за рахунок зменшення аварій і пошкоджень.

#### Список літератури

1. НПАОП 45.2-1.01-98. *Правила обстежень, оцінки технічного стану та паспортизації виробничих будівель і споруд.*
2. НПАОП 10.0-1.01.-10. *Правила безпеки у вугільних шахтах.*
3. СНиП II-23-81. *Стальные конструкции (Сталеві конструкції).*
4. ДБН В.1.2-14-2009. *Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ.*
5. ДБН-362-92. *Оцінка технічного стану сталевих конструкцій виробничих будівель і споруд, що знаходяться в експлуатації.*
6. ДБН В.1.2-6-2008. *Основні вимоги до будівель і споруд. Механічний опір та стійкість.*
7. ДСТУ БВ.2-200:2014. *Конструкции металлические стропильные. Требования к монтажу. (Конструкції металеві будівельні. Вимоги до монтажу).*
8. ДСТУ-НБВ.1.2-18:2016. *Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінки їх технічного стану.*
9. СОУ-Н10.1.00174125.001:2012. *Порядок і організація обстеження металевих копрів.*
10. СОУ10.1.00174125.015:2008. *Несучі металеві конструкції гірничого устаткування і гірничотехнічних споруд. Оцінка технічного стану.*
11. КД12.009-95 (із змінами). *Порядок і організація обстеження будівельних конструкцій будівель і споруд шахтної поверхні.*
12. КД12.011-96 (із змінами). *Будівлі і споруди технологічних комплексів шахтної поверхні. Вимоги до експлуатації.*
13. Куліш В. А., Крилов Е. С., Литвиненко Л. Ю. (2011) Розробка галузевого стандарту (СОУ) несучі металеві конструкції гірничого устаткування і гірничотехнічних споруд. Оцінка технічного стану. *Матер. 11 Міжнародної Промислової конференції «Ефективність реалізації научного, ресурсного і промислового потенціала в сучасних умовах»*, г. Донецьк, сс. 58–63.
10. SOU10.1.00174125.015:2008: *Load-carrying metal structures of mine equipment and mine technical constructions. Assessment of technical condition* [in Ukrainian].
11. KD12.009-95 (modified): *Procedure and organizing of inspection of building structures, buildings and constructions of mine surface* [in Ukrainian].
12. KD12.011-96 (modified): *Buildings and constructions of technological complexes of mining surface. Operational requirements* [in Ukrainian].
13. Kulish, V.A., Krylov, E.S., Lytvynenko, L.Yu. (2011) Development of industry standard (SOU) on load-carrying metal structures of mine equipment and mine technical constructions. Assessment of technical condition. In: *Proc. of Int. Industrial Conf. on Effectiveness of Realization of Scientific, Resource and Industrial Potential in Modern Conditions*. Donetsk, 58-63.

#### References

1. NPAOP45.2-1.01-98: *Regulations for inspection, assessment of technical condition and certification of industrial buildings and constructions* [in Ukrainian].
2. NPAOP 10.0-1.01-10: *Safety regulations in coal mines* [in Ukrainian].
3. SNiP II-23-81: *Steel structures* [in Russian].
4. DBN V.1.2-14-2009: *General principles of reliability control and structural safety of buildings, constructions, building structures and foundations* [in Ukrainian].
5. DBN-362-92: *Assessment of technical condition of steel structures of industrial buildings and constructions being under operation* [in Ukrainian].
6. DBN V.1.2-6-2008: *Main requirements to buildings and constructions. Mechanical resistance and strength* [in Ukrainian].
7. DSTU BV.2-200:2014: *Building metal structures. Installation specification* [in Russian].
8. DSTU-NBV.1.2-18:2016: *Recommendations for inspection of buildings and constructions to determine their technical condition* [in Ukrainian].
9. SOU-N10.1.00174125.001:2012: *Procedure and organizing of inspection of metal drill derricks* [in Ukrainian].

#### КОНТРОЛЬ И ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ШАХТНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

В. А. КУЛИШ, Е. С. КРЫЛОВ

ГП «Институт «УкрНИИПроект» Минэнергоугля Украины.  
03142, г. Киев, просп., Академика Палладина, 46/2.  
E-mail: post.upn@ukr.net

Рассмотрен ряд отраслевых нормативно-технических документов, регламентирующих процедуру контроля и оценки технического состояния металлических конструкций строений и сооружений шахтной поверхности в процессе их обследования и паспортизации. Они соответствуют требованиям действующих законодательных и нормативных документов и способствуют повышению безопасности и надежности эксплуатации зданий и сооружений шахтной поверхности за счет своевременного получения информации об их фактическом техническом состоянии. Библиогр. 13, табл. 2.

Ключевые слова: контроль, оценка, техническое состояние, металлическая конструкция, здание, сооружение, шахтная поверхность, надежность, безопасность

#### MONITORING AND ASSESSMENT OF THE TECHNICAL CONDITION OF METALS STRUCTURES OF BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS OF MINE SURFACE

V.A.KULISH, E.S.KRYLOV

SC «UkrDNIIProekt» Institute of the Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine, 46/2 Akademik Palladin str., Kyiv.  
E-mail: post.upn@ukr.net

A number of branch normative-technical documents are considered, which specify the procedure of control and evaluation of the technical condition of metal structures of buildings and constructions of the mine surface during their examination and certification. They are responsible for the requirements of the currently valid legal and normative documents and promote an improvement of safety and reliability of buildings and constructions of the mine surface, due to timely acquisition of data on their actual technical condition. 13 References, 2 Tables

Keywords: control, assessment, technical condition, metal structure, building, construction, mine surface, reliability, safety

Надійшла до редакції  
19.02.2018

## МЕТОДОЛОГІЯ ТА АПАРАТУРА ДЛЯ ОПЕРАТИВНИХ КОМПЛЕКСНИХ ОБСТЕЖЕНЬ ПІДЗЕМНИХ ТРУБОПРОВОДІВ\*

Р. М. ДЖАЛА, Б. Я. ВЕРБЕНЕЦЬ, М. І. МЕЛЬНИК, О. М. СЕМЕНЮК, О. О. ЧЕРВІНКА

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

Розвинуто метод оперативних обстежень та визначення параметрів протикорозійного захисту сталевих з ізоляційним покривом підземних трубопроводів за комплексом безконтактних вимірювань струмів і контактної електрометрії. Показано нові можливості визначення розподілу густини струму катодного захисту та питомого перехідного опору на ділянках підземних трубопроводів під час експлуатації. Описано схеми та функціональні можливості створеної апаратури вимірювань постійних і змінних потенціалів електричного поля, безконтактних вимірювань струмів з електронною пам'яттю та приклади їх використання. Бібліогр. 10, рис. 5.

*Ключові слова:* трубопроводи підземні, неруйнівний контроль протикорозійного захисту, метод безконтактних обстежень, густина струму катодного захисту, перехідний опір ізоляційного покриття, контроль ізоляції, електричні потенціали, вимірвальна апаратура

Підземні трубопроводи (ПТ) відіграють важливу роль у промисловості та житті суспільства і є важливим стратегічним чинником народногосподарського комплексу держави. У різних регіонах світу налічують біля 2 млн км трубопроводів, якими транспортують газ, нафту, сировину і продукти хімічної промисловості. В Україні – понад 38,6 тис. км магістральних газопроводів, 4500 км нафтопроводів, 570 км аміакопроводів, 256 тис. км труб газових мереж. Використовують сталеві трубопроводи нафто- і газопромислів, продуктопроводи нафтогазової і хімічної промисловості, підземні водогони для населення, підприємств та зрошувальних систем. Крім цього, діє розвинена мережа підземних кабелів для передачі електроенергії і зв'язку. Впливи середовища призводять до корозійних пошкоджень трубопроводів та інших металевих конструкцій і споруд. Це спричинює втрати і перебої постачання транспортованих продуктів, забруднення довкілля, аварії і катастрофи; необхідні роботи і фінансові витрати на ліквідацію результатів аварій. Щоб запобігти незворотним корозійним пошкодженням потрібно вчасно і у відповідних місцях налагоджувати протикорозійний захист, що вимагає періодичних обстежень, виявлення небезпечних місць і ділянок [1, 2].

Основним чинником, що скорочує термін придатності до експлуатації підземних споруд є корозія металу, яка спричинює більше чверті аварій трубопроводів. З часом кількість корозійних пошкоджень зростає аж до непридатності споруди для подальшої експлуатації. Для підвищення надійності та продовження термінів експлуатації трубопроводів використовують комплексний про-

तिकорозійний захист (ПКЗ) ізоляційними покриттями і катодною поляризацією [2]. Традиційно контроль стану ПКЗ ПТ проводять контактними методами і засобами [1, 2], які достатньо прості як по суті, так і в інструментальній реалізації. Проте їх продуктивність обмежується трудомісткістю і складнощами забезпечення достатньої кількості надійних контактів вимірвальних електродів з трубою і землею. З фізичної точки зору в електрометрії використовують тільки частину інформації, що є в електричному полі. Магнітне ж поле найчастіше використовують лише для визначення розміщення трубопроводів [1, 3].

На основі теоретичних і експериментальних досліджень електромагнітного поля підземних струмопровідних комунікацій у ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України розроблено нові способи і пристрої та виготовлено зразки приладів для безконтактних вимірювань струмів (БВС) [1, 3–8]. Застосування їх у реальних умовах підтвердило перспективність вибраного напрямку. Безконтактні методи мають значні переваги порівняно з традиційними контактними методами. Проте вони не мали широкого використання і потребують спеціальних засобів вимірювань. Метою даної роботи є створення (на основі результатів проведених досліджень, розробок, натурних випробувань та практичного досвіду) ефективних методів і апаратури оперативних діагностичних обстежень і контролю стану ПКЗ для запобігання пошкодженням та продовження ресурсу трубопровідного транспорту.

**Визначення густини постійної складової струму катодного захисту на ділянці ПТ.** Сучасні електромагнітні безконтактні методи дають

\*За матеріалами роботи, що виконана в рамках цільової комплексної програми НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин» за останні роки ([www.patonpublishinghouse.com/rus/compilations](http://www.patonpublishinghouse.com/rus/compilations)).

© Р. М. Джала, Б. Я. Вербенець, М. І. Мельник, О. М. Семенюк, О. О. Червінка, 2018

можливість вимірювання змінного струму, що протікає вздовж ПТ [1, 3]. Це дозволяє безпосередньо визначати витікання змінного струму на ділянці ПТ [3–8]. Проте змінний струм не захищає метал від корозії, а безконтактні вимірювання постійного струму ПТ ускладнені наявністю потужного магнітного поля Землі. Тому відомі методи мало придатні для прямого вимірювання постійного струму ПТ. Виникла задача розроблення нового методу визначення густини струму захисту від корозії ділянки ПТ шляхом вибору вимірюваних сигналів та алгоритму їх опрацювання з метою контролю розподілу витрат струму захисту від корозії.

Для вирішення поставленої задачі пропонуємо вимірювати значення  $J_1$  та  $J_2$  змінної компоненти струму, що протікає по трубопроводу на початку і кінці ділянки ПТ. Визначаємо довжину ділянки  $l$ . Додатково встановлюємо у ґрунт перший електрод  $M$  біля труби (рис. 1) і другий електрод  $N$  на відстані  $x$  від ПТ. Міряємо постійну  $U_g$  та змінну  $V_g$  електричні напруги у ґрунті, густину струму захисту від корозії ПТ обчислюємо [4] за формулою

$$i_{pr} = \frac{|J_1 - J_2| U_g}{S V_g}, \quad (1)$$

де  $S$  – площа поверхні ПТ на ділянці – обчислюють за діаметром трубопроводу  $d$  і довжиною  $l$  ділянки  $S = \pi dl$ . За знаком постійної напруги  $U_g$  визначаємо напрям струму поляризації.

Фізичною основою запропонованого методу є наявність у випрямленому струмі захисту від корозії, який подають на ПТ від установки катодного захисту (УКЗ), постійної і змінних складових (гармонік) та пропорційність між напругою і струмом. Постійна  $i$  та змінна  $j$  складові струму УКЗ, що натікає з ґрунту в трубопровід на ділянці, створюють на поверхні землі між точками  $M$  і  $N$  постійну  $U_g$  і змінну  $V_g$  електричні напруги, пропорційні відповідним складовим струму  $i/j = U_g/V_g$ . Якщо ж трубопровід захищають гальванічним протектором, то для визначення густини струму за даним методом додатково струм на виході протектора мо-

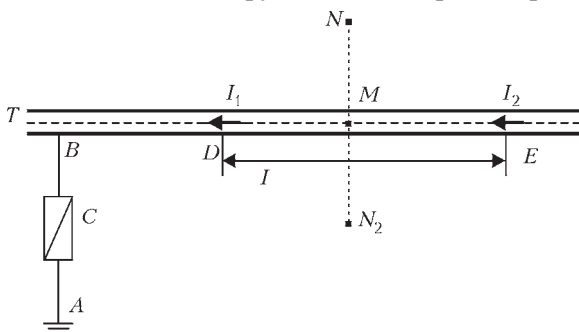


Рис. 1. Розміщення точок  $D$  і  $E$  безконтактних вимірювань струмів та електродів  $M$  і  $N$  контактних вимірювань електричних напруг для визначення густини струму захисту від корозії на ділянці підземного трубопроводу

дулюють змінним сигналом низької частоти (наприклад, 100 Гц).

Розроблений спосіб [5] призначений для визначення густини струму катодного захисту від корозії ПТ і може бути використаний при обстеженнях, неруйнівному контролю і налагодженні електрохімічного захисту (ЕХЗ) ПТ та інших струмопровідних комунікацій.

**Визначення перехідного опору захисного покриття на ділянці ПТ.** Перехідний питомий опір ізоляційного покриття  $\rho_{in}$  є основним показником, що характеризує його стан на ділянці підземного трубопроводу [1, 2]. Його визначають відношенням різниці потенціалів на захисному покритті  $\Delta E_{in}$  (V) до густини струму  $i_n$  (A/m<sup>2</sup>), який протікає через покриття на цій ділянці.

$$\rho_{in} = \Delta E_{in} / i_n, \text{ Ом} \cdot \text{м}^2. \quad (2)$$

Спад потенціалу на захисному покритті ПТ, визначаємо за формулою

$$\Delta E_{in} = E_g + E_{pol} - E_n, \quad (3)$$

де  $E$  – вимірювана електрична напруга – потенціал ПТ відносно електрода, встановленого над ПТ [2] у точці  $M$  на ділянці  $n$ ;  $E_{pol}$  – поляризаційний потенціал трубопроводу на даній ділянці, який вимірюють відомим методом вимкнення УКЗ [1, 2]. Для спрощення процедури можна визначати  $E_{pol}$  за вимірами двох різниць потенціалів і змінних електричних напруг [1], що дає можливість вилучати омичну складову різниці потенціалів без відключення УКЗ.

Спад потенціалу в ґрунті над ПТ  $E_g$  (між поверхнею труби і електродом порівняння, розміщеним над трубою в точці  $M$ ) дорівнює різниці потенціалів  $E_x$  між точками  $M$  і  $N$ , якщо відстань  $x$  між цими точками [1] задовольняє умові:

$$\text{якщо } x = h \sqrt{2 \left( \frac{2h}{d} - 1 \right)}, \text{ то } E_g = E_x, \quad (4)$$

де  $h$  – глибина залягання трубопроводу з діаметром  $d$ . Таке вимірювання [1] пропонуємо замість громіздкого розрахунку опору розтіканню струму в ґрунті [2].

Для визначення густини струму за формулою (1) віддаль між точками мірювання струму  $l_n$  – довжина ділянки ПТ, яку контролюють, має бути такою, щоб різниця між вимірами струму  $\Delta J_n$  була більшою від похибки  $\Delta J$  вимірювань струму:  $\Delta J_n = |J_{n-1} - J_n| > \Delta J$ . Якщо ж  $\Delta J_n < \Delta J$ , то це свідчить про дуже добрий стан ізоляційного покриття ПТ на даній ділянці і віддаль між точками мірювання струму вздовж ПТ збільшуємо. За поганого стану ізоляції різниця вимірів струму  $\Delta J_n$  зростає і зону контролю  $l_n$  можна зменшувати до значення сумірного з глибиною  $h$  залягання ПТ. Це дає можливість уточнювати місце локального пошкодження ізоляційного покриття ПТ.

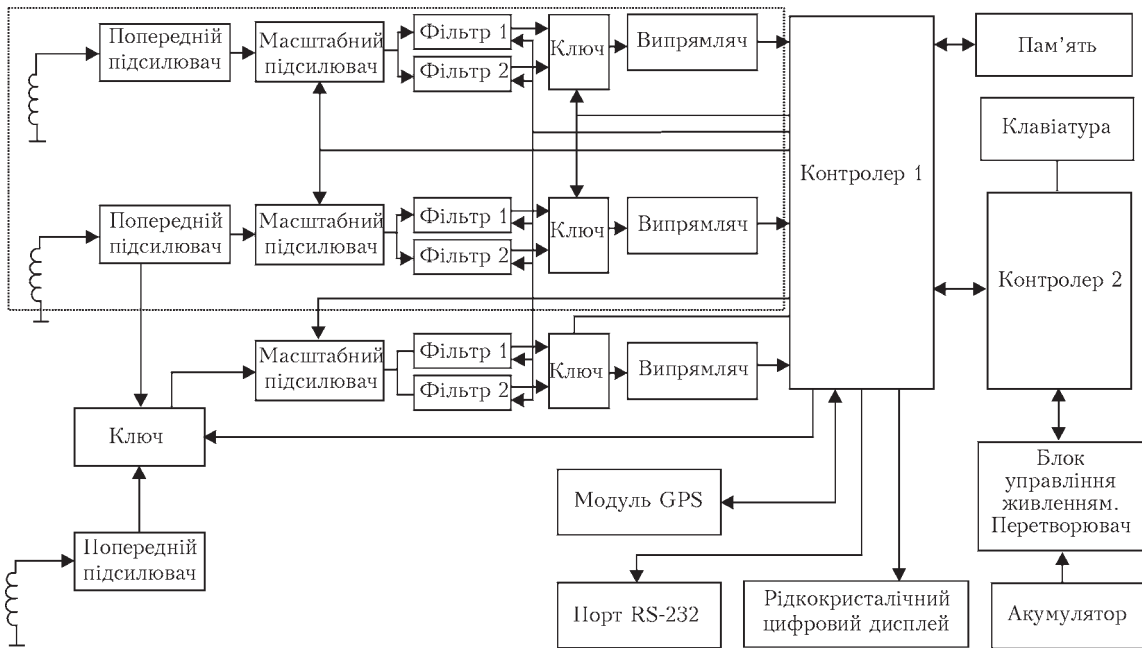


Рис. 2. Функціональна блок-схема апаратури БВС-2

Для реалізації описаних методів на основі проведених досліджень розроблено апаратуру безконтактних БВС-2 і контактних ВПЗН оперативних комплексних обстежень ПТ. Розроблено доповнення до нормативної документації.

**Апаратура БВС-2 для безконтактних оперативних обстежень ПТ** призначена для вимірювань струмів  $J_n$  і глибини  $h$  залягання підземних струмопроводів з автоматичним записом вимірів у електронну пам'ять для аналізу і документування.

Апаратура БВС-2 містить аналогові канали підсилення та мікроконтролери для цифрової обробки і управління (рис. 2). Є три аналогові канали, кожен з яких складається з індуктивного датчика, підсилювача, двох смугових фільтрів на різні частоти, електронного ключа вибору частоти, детектора та згладжувального каскаду, сигнали з яких подаються на АЦП для переведення у цифрову форму та подальшої обробки. Фільтри забезпечують вибірковість корисного сигналу від завад в умовах роботи від поля струмів УКЗ або додаткового генератора сигналу. Передбачено два режими пошуку осі ПТ.

Апаратура працює у двох режимах – вимірювання з обробкою та записом даних і в режимі перегляду записаних у пам'яті даних. Перший мікроконтролер містить три десятирозрядних АЦП і забезпечує автоматичне управління підсиленням у чотирьох діапазонах, вибором однієї з двох робочих частот, проводить розрахунок відстані до осі та струму в трубопроводі, запис та зчитування даних з пам'яті, виводить всю необхідну інформацію на рідкокристалічний цифровий дисплей. Інтерфейс – для передачі даних у ПК для подальшої обробки та протоколювання. Ємність енергонезалежної пам'яті дозволяє записати та зберігати

ти дані 1000 вимірів з можливістю їх перегляду. Для фіксації місця і часу виміру введено модуль *GPS*, дані з якого також подаються у перший мікроконтролер. Другий мікроконтролер керує роботою модуля живлення відповідно у режимах вимірювання та зчитування, контролює стан елементів живлення з автоматичним відключенням при повному розряді, забезпечує роботу клавіатури управління.

Живлення апаратури – від одного акумулятора 6 В. Передбачена зарядка від мережі 220 В, акумулятора 12 В, або від сонячних елементів. Передбачена підсвітка дисплея та клавіатури. Апаратура змонтована в пластиковому корпусі (рис. 3) і призначена для використання в польових умовах.

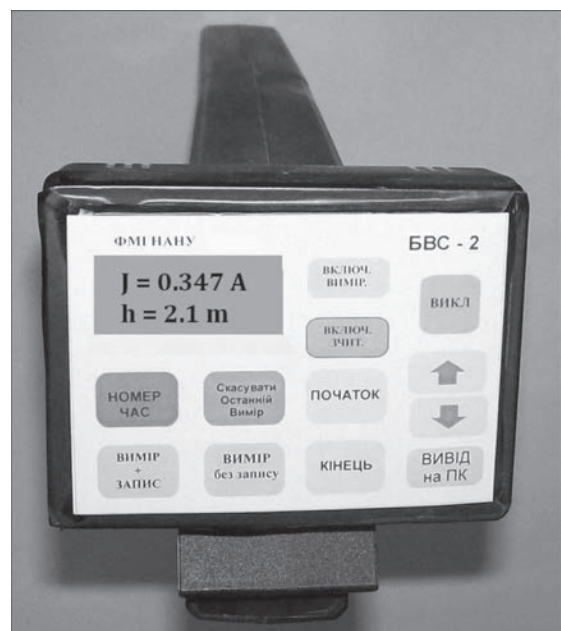


Рис. 3. Загальний вигляд апаратури безконтактних вимірювань струмів БВС-2

Порівняно з попередніми розробками [1] БВС-2 має покращені технічні й експлуатаційні характеристики. Зменшено (у 2 рази порівняно з БВС-1) рівень шумів, що дозволило розширити динамічний діапазон (4 діапазони мірювання струму від одиниць міліампер до 100 А за глибин залягання ПТ до

вель шумів, що дозволило розширити динамічний діапазон (4 діапазони мірювання струму від одиниць міліампер до 100 А за глибин залягання ПТ до

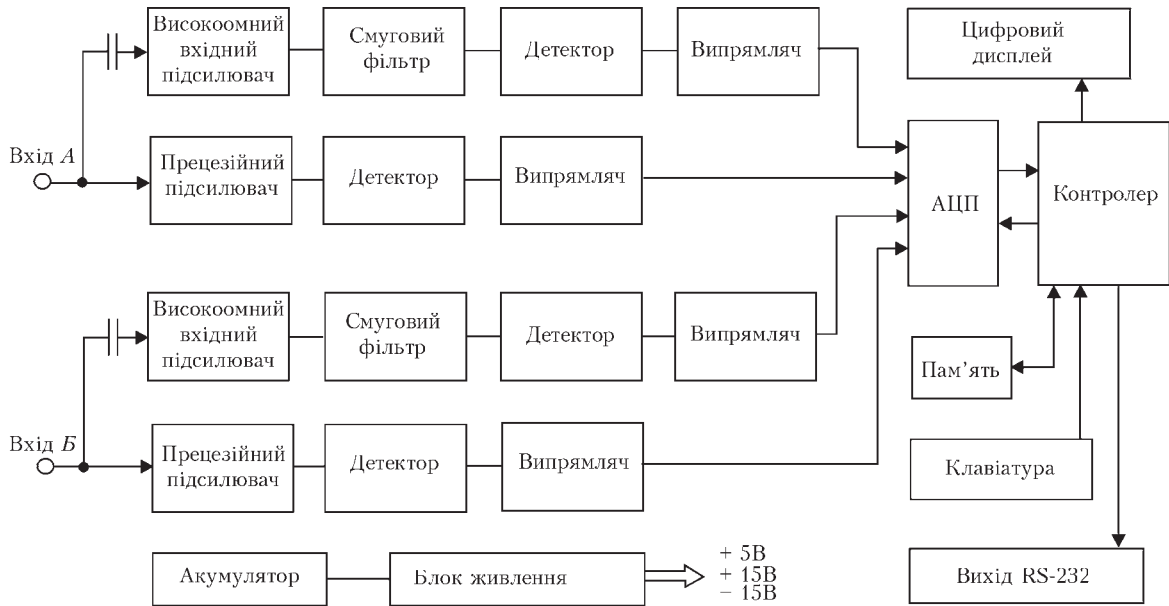


Рис. 4. Функціональна блок-схема вимірювача постійних і змінних електричних напруг ВПЗН

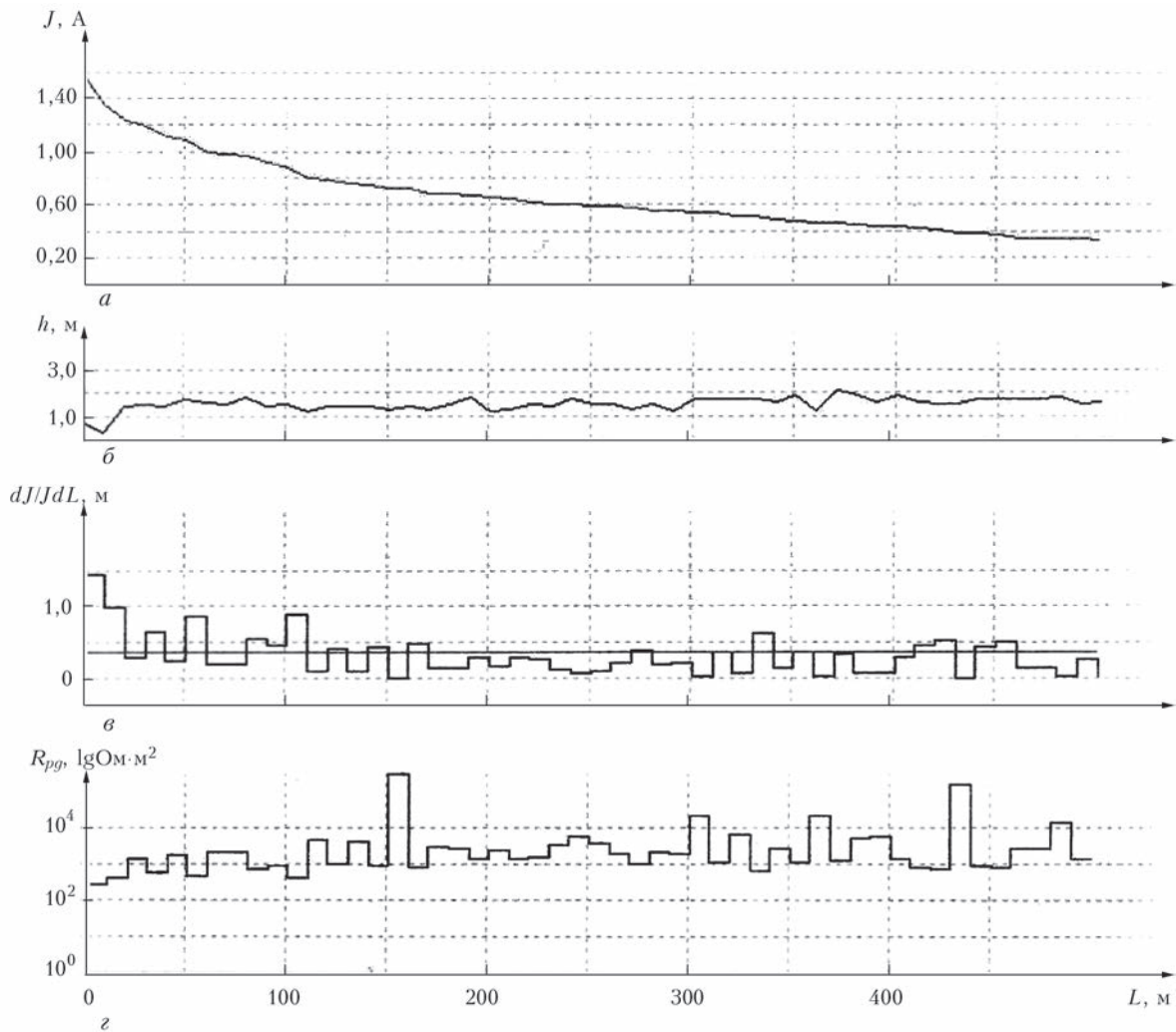


Рис. 5. Результати обстеження ділянки магістрального газопроводу Липники-Львів: розподіл вздовж траси величини струму  $J$  (а); глибини  $h$  залягання ПТ (б); відносні витрати струму  $dJ/JdL$  та рівень критичної витрати струму (перевищення якого вказує місця незадовільної ізоляції ПТ) (в); перехідний опір «труба-земля» (з)



8 м). Застосовано мікроконтролер типу PIC16F833 з більшим об'ємом програмної пам'яті та розширеним інтерфейсом. Введено дві робочі частоти, що дає змогу проводити обстеження ПТ як у зоні дії УКЗ, так і з використанням власного спеціального генератора сигналів для роботи за відсутності УКЗ чи в умовах підвищених завад. Зменшено на 40 % рівень споживання, що збільшило час роботи приладу без дозарядки акумуляторів.

**Вимірювач постійних потенціалів та змінних електричних напруг.** Розроблена апаратура ВПЗН призначена для вимірювань постійних і змінних електричних потенціалів за описаними вище методами. ВПЗН має два входи і чотири канали (рис. 4). Застосування мікроконтролера забезпечує можливість вибору робочої частоти, одночасний вивід усіх значень на рідкокристалічний цифровий дисплей, запис вимірних даних в електронну пам'ять, перегляд накопичених даних і передача їх у ПК.

Для виділення корисного сигналу введено смугові фільтри на дві фіксовані частоти. Роботою ВПЗН керує мікроконтролер, до якого підключені клавіатура, рідкокристалічний цифровий дисплей, енергонезалежна пам'ять, блок живлення з перетворювачем напруги та інтерфейс RS-232 для передачі даних у ПК. Діапазон вимірювань вхідних напруг вибирається мікроконтролером автоматично.

Використання створеної апаратури дає можливість проводити інтегральні, диференціальні (рис. 5) і локальні обстеження і контроль параметрів ПКЗ ПТ [1, 3, 5–8]. Проведено натурні випробування БВС під час обстежень магістральних газопроводів УМГ «Львівтрансгаз», водогону ЛМКП «Львівводоканал», підземних водо- та газопровідних мереж. Типові результати БВС, які неможливо отримати контактними методами, опубліковані в роботах [3, 5–9].

За результатами проведених досліджень, випробувань і використання БВС розроблено пропозиції змін і доповнень до ДСТУ 4219-2003 «Трубопроводи сталеві магістральні. Загальні вимоги до захисту від корозії». Запропоновано «Метод контролю стану захисного покриття за БВС на ділянці трубопроводу під час експлуатації», та «Методи оперативного пошуку місць пошкоджень захисного покриття ПТ за розподілом струму між гілками трубопроводів і за критичними витратами (заниканням) струму вздовж трубопроводу» [10].

## Висновки

1. Запропоновано новий метод визначення розподілу густини струму катодного захисту за безконтактними вимірами змінної складової. Розроблено метод визначення перехідного опору «труба-земля» та його компонент: перехідного питомого опору ізоляції на ділянці ПТ під час експлуатації, питомого опору ґрунту, що оточує ПТ,

опору поляризації ПТ. Розроблено проект доповнень до нормативної документації.

2. Розроблено схеми і виготовлено зразки апаратури БВС-2 для оперативних безконтактних вимірювань струмів та ВПЗН вимірювань постійних і змінних електричних напруг з автоматичним записом вимірів у електронній пам'яті. На основі синхронного детектування розроблено фізичну модель завадостійкого безконтактного вимірювача змінної компоненти електричного поля УКЗ ПТ.

3. Використання результатів досліджень підвищує оперативність та інформативність обстежень і вірогідність результатів контролю і діагностики стану захисту від корозії для запобігання пошкоджень та продовження ресурсу ПТ, що транспортують газ, нафту, воду, продукти хімічної промисловості.

## Список літератури

1. Джала Р. М. (2009) *Основи обстеження і контролю корозійного стану підземних трубопроводів. Механіка руйнування та міцність матеріалів*. Довідн. посібник. Панасюк В. В. (ред.). Т. 11, Львів, Сполом, сс. 143–184.
2. ДСТУ 4219-2003. *Трубопроводи сталеві магістральні. Загальні вимоги до захисту від корозії*.
3. Dzhala R. M., Verbenets V. Ya. (2011) Electromagnetic method and procedures of nondestructive inspection of the corrosion protection of underground pipelines. *Materials Science*, 47, 2, 245–254.
4. Джала Р., Вербенець Б., Джала В. (2010) Контроль протикорозійного захисту магістральних трубопроводів за БВС. *ФХММ*, 8, 2, сс. 615–619.
5. Джала Р. М. (2011) *Спосіб визначення густини струму захисту від корозії на ділянці підземного трубопроводу*. Україна. Пат. UA 94798. МПК G01R 19/08, C23F 13/02.
6. Джала Р. М., Савула С. Ф., Вербенець Б. Я. та ін. (2009) Технологія обстежень підземних трубопроводів з використанням безконтактних вимірювань струмів. *Методи та прилади контролю якості*, 22, 22–27.
7. Джала Р. М., Вербенець Б. Я., Винник О. Й. і др. (2011) Контроль протикорозійного захисту підземних трубопроводів безконтактним методом. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*, 4(41), 21–25.
8. Джала Р. М., Дикмарова Л. П., Вербенець Б. Я., Хлипняч П. М. (2006) Безконтактний метод і апаратура для оперативних обстежень підземних трубопроводів. Зб. наук. ст.: *Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин*. Київ, ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАНУ, сс. 57–61.
9. Джала Р. М., Вербенець Б. Я., Винник О. Й. (2012) Основи, стан і перспективи використання безконтактного методу обстежень і контролю ПКЗ підземних трубопроводів. *Актуальні питання застосування неруйнівного контролю для трубовідного транспорту та інших відповідальних об'єктів*. Київ, ІЕЗ ім. Є. О. Патона, ПАТ «Укртрансгаз», сс. 73–74.
10. Джала Р., Вербенець Б., Винник О. (2011) *Пропозиція змін і доповнень до ДСТУ 4219-2003. Трубопроводи сталеві магістральні. Загальні вимоги до захисту від корозії*. Львів, ФМІ НАН України.

## References

1. Dzhala, R.M. (2009) *Basics of inspection and control of corrosion state of underground pipelines. Mechanics of fracture and strength of materials*. In: Refer. book. Ed. by V.V. Panasyuk, Vol. 11. Lviv, Spolom, 143-184 [in Ukrainian].
2. DSTU 4219-2003: *Steel main pipelines. General requirements to corrosion protection* [in Ukrainian].
3. Dzhala, R.M., Verbenets, V.Ya. (2011) Electromagnetic method and procedures of nondestructive inspection of the corrosion protection of underground pipelines. *Materials Sci.*, 47(2), 245-254.

4. Dzhala, R., Verbenets, B., Dzhala, V. (2010) Control of corrosion protection of main pipelines based on contactless current measurements. *FKhMM*, 8(2), 615-619 [in Ukrainian].
5. Dzhala, R.M. (2011) *Method for determination of current density of corrosion protection in section of underground pipeline*. Pat. UA 94798, Int. Cl. GO1R 19/08, C23F 13/02 [in Ukrainian].
6. Dzhala, R.M., Savula, S.F., Verbenets, B.Ya. et al. (2009) Technology of inspections of underground pipelines based on contactless current measurements. *Metody ta Prylady Kontrolyu Yakosti*, 22, 22-27 [in Ukrainian].
7. Dzhala, R.M., Verbenets, B.Ya., Vynnyk, O.J. (2011) Control of corrosion protection of underground pipelines by contactless method. *Rozvidka ta Rozrobka Naftovykh i Gazovykh Rodovyshch*, 4(41), 21-25 [in Ukrainian].
8. Dzhala, R.M., Dykmarova, L.P., Verbenets, B.Ya., Khlypn-yach, P.M. (2006) *Contactless method and instrumentation for operative inspections of underground pipelines*. In: *Problems of resource and safety operation of structures, constructions and machines*: Transact. Kyiv, PWI, 57-61 [in Ukrainian].
9. Dzhala, R.M., Verbenets, B.Ya., Vynnyk, O.J. (2012) *Basics, state-of-the-art and prospects of application of contactless inspection methods and corrosion protection control of underground pipelines*. *Actual problems of nondestructive testing for pipeline transport and other critical facilities*. Kyiv, PWI, PAT Ukrtransgaz, 73-74 [in Ukrainian].
10. Dzhala, R., Verbenets, B., Vynnyk, O. (2011) *Proposition for changes and supplements to DSTU 4219-2003: Steel main pipelines. General requirements for corrosion protection*. Lviv, PMI [in Ukrainian].

МЕТОДОЛОГИЯ И АППАРАТУРА ДЛЯ ОПЕРАТИВНЫХ КОМПЛЕКСНЫХ ОБСЛЕДОВАНИЙ ПОДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Р. М. ДЖАЛА, Б. Я. ВЕРБЕНЕЦ, М. И. МЕЛЬНИК,  
О. Н. СЕМЕНЮК, О. А. ЧЕРВИНКА

Физико-механический институт им. Г. В. Карпенка НАН  
Украины. 79060, г. Львов, ул. Наукова, 5.  
E-mail: dzhala@ipm.lviv.ua

Развит метод оперативных обследований и определения параметров противокоррозионной защиты стальных с изоляционным покрытием подземных трубопроводов с помощью

комплекса бесконтактных измерений токов и контактной электрометрии. Показаны новые возможности определения распределения плотности тока катодной защиты и удельного переходного сопротивления на участках подземных трубопроводов во время эксплуатации. Описаны схемы и функциональные возможности созданной аппаратуры измерений постоянных и переменных потенциалов электрического поля, бесконтактных измерений токов с электронной памятью и примеры их использования. Библиогр. 10, рис. 5.

Ключевые слова: трубопроводы подземные, неразрушающий контроль противокоррозионной защиты, метод бесконтактных обследований, плотность тока катодной защиты, переходное сопротивление изоляционного покрытия, контроль изоляции, электрические потенциалы, измерительная аппаратура

METROLOGY AND INSTRUMENTATION FOR OPERATIVE COMPLEX EXAMINATION OF UNDERGROUND PIPELINES

R. M. JALA, B. Ya. VERBENETS, M. I. MELNIK,  
O. M. SEMENYUK, O. O. CHEVINKA

G. V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of  
Ukraine, 5 Naukova str., 79060, Lviv, Ukraine

A method for operative examination and determination of the parameters of anticorrosion protection of underground steel pipelines with an insulation coating by a set of contactless measurements of currents and contact electrometry was developed. New possibilities are shown for determination of the distribution of cathodic protection current density and specific contact resistance in underground pipeline sections in operation. Circuits and functional capabilities of the developed instrumentation with electronic memory for measurement of constant and variable potentials of the electric field, and contactless measurements of currents and their application examples are shown.

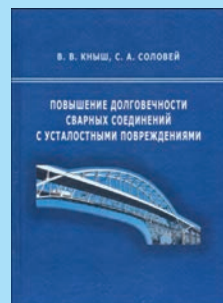
Keywords: underground pipelines, nondestructive testing of anticorrosion protection, contactless examination method, cathodic protection current density, contact resistance of insulation coating, electric potentials, measuring instrumentation

Надійшла до редакції  
08.12.2017

НОВАЯ КНИГА

В. В. Кныш, С. А. Соловей. **Повышение долговечности сварных соединений с усталостными повреждениями.** – Киев, КПИ им. Игора Сикорского, 2017. – 315 с. Твердый переплет, 150×225 мм.

Монография посвящена проблеме продления срока службы элементов сварных металлоконструкций, работающих в условиях циклических нагрузок, на разных стадиях их поврежденности: от накопления усталостных повреждений до развития магистральных трещин. Исследовано влияние высокочастотной механической проковки на повышение циклической долговечности сварных соединений как на стадии изготовления, так и после длительной эксплуатации. Предложены подходы к расчетному определению кинетики усталостных трещин в полях остаточных напряжений растяжения и сжатия. Рассмотрены конструктивные и технологические способы торможения усталостных трещин. Для научных и инженерно-технических работников, занимающихся исследованиями в области усталости элементов сварных металлоконструкций длительной эксплуатации, расчетными методами определения и продления их ресурса. Может быть полезна студентам и аспирантам высших учебных заведений технических специальностей.



## КОНФЕРЕНЦІЯ З НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ В НОВОМУ ФОРМАТІ

24–27 жовтня 2017 р. Українське товариство з неруйнівного контролю та технічної діагностики (УТ НКТД) за ініціативою та підтримкою ПП «ДП-ТЕСТ» (директор О.В. Павлій) провело в польському курортному містечку Наленчув Люблінського воєводства науково-технічну конференцію з міжнародною участю «Неруйнівний контроль в контексті асоційованого членства України в Європейському Союзі: законодавство, технічні регламенти, стандартизація, сертифікація, лабораторії».

На пленарному засіданні після низки привітань виступили професор Карпаш О. М. (заступник голови УТ НКТД з наукових питань, професор Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (ІФНТУНГ) та доцент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Сікорського» (НТУУ «КПІ»)), завідувач кафедри приладів і систем НК, д. п. н. Протасов А. Г., які розповіли про стан навчання та його перспективи в світлі реформ у вищій освіті. Про нові розробки та традиційні пропозиції фірми OLYMPUS розповіли Petr Dobšák CEE Region Distribution Manager Olympus Scientific Solutions Division (Чехія) та Дмитро Померанцев, Manager of Industrial department, SSD division OLYMPUS MOSCOW LLC (РФ).

Про розробки засобів неруйнівного контролю НВФ «Ультракон» розповів директор фірми І. В. Павлій. Досвідом роботи ОСП «Євростандарт» поділилася Лукьянова Л. Г. (м. Запоріжжя).

У рамках конференції відбулося два великих семінари, які провели запрошені європейські експерти – проф. А. Скордев (Болгарія) та Томаш Яніак (Польща). Перший семінар був присвяче-

ний європейському законодавству та нормативним вимогам у сфері неруйнівного контролю, а другий – системі вищої освіти в ЄС та можливості для України у цій сфері.

Доповідачем на першому семінарі був проф. А. Скордев (Болгарія). Він зупинився на цілому ряді актуальних питань європейського технічного законодавства:

- основи європейського технічного законодавства в сфері НКТД;
- досвід та стратегія впровадження директив ЄС;
- європейська стандартизація в сфері НК: стан і проблеми;
- директиви нового підходу, валідація процедур НК, європейські регламенти в галузі ринкового нагляду;
- місце НК в сертифікації продукції;
- регулювання безпечної експлуатації обладнання під тиском в країнах ЄС;
- законодавство щодо органів інспектування, сертифікації та випробувальних лабораторій;
- основні відмінності між повірjenням та калібруванням засобів НК;
- характеристики якості процесів НК;
- стандартизація програм навчання фахівців з НК тощо.

При розгляді цих питань неодноразово виникали гарячі дискусії.

Запрошеним доповідачем на другий семінар був Томаш Яніак (Польща), експерт Центрально-європейської академії навчання та сертифікації. Він зосередив увагу учасників на питаннях вищої освіти та науки, а саме:

- проектні офіси в університетах;
- індивідуальна мобільність науковців;
- міжнародні програми залучення коштів для реалізації проектів.

Третім блоком роботи конференції стали питання, пов'язані з системою оцінки відповідності в Україні: вимоги до випробувальних лабораторій та кваліфікація і сертифікація персоналу неруйнівного контролю. Марина Лаврентьева, провідний аудитор з сертифікації систем управління якістю, генеральний директор Глобал Сертифік (м. Дніпро) висвітлила такі питання:

- підготовка випробувальної лабораторії до акредитації згідно з вимогами ДСТУ EN ISO 17025;
- побудова системи управління якістю підприємства;



Доповідь С. Щупак



Учасники конференції

– вимоги Національного агентства з акредитації України;  
– підготовка до аудиту та усунення виявлених невідповідностей.

Світлана Щупак, керівник групи ІЕЗ ім. Є. О. Патона, відповідальний секретар ТК-78 «Технічна діагностика та неруйнівний контроль», доповіла про підсумки роботи 8-ї Міжнародної конференції з стандартизації і сертифікації «Certification-2017: ISO 9712 – What's next and how go on?», а також ознайомила присутніх представників органів сертифікації, учбових і агеґтаційних центрів, що займаються кваліфікацією і сертифікацією персоналу НК, підприємств-виробників, сервісних організацій, випробувальних лабораторій, з проектами міжнародних стандартів, які зараз перебувають на розгляді ISO/TC 135 «Неруйнівний контроль» Міжнародної організації стандартизації. Ці стандарти визначатимуть вимоги до системи підготовки та підтвердження кваліфікації фахівців НК і після їх прийняття можуть істотно вплинути на систему кваліфікації і сертифікації персоналу не лише України, а й у глобальному масштабі. Стандарти, які розглядалися:

- ISO 9712 Неруйнівний контроль. Кваліфікація і сертифікації персоналу НК;
- ISO/TR 25107 Настанови щодо програм навчання фахівців неруйнівного контролю;
- ISO/TR 25108 Вимоги до організацій, що проводять навчання неруйнівному контролю;
- ISO/TS 21759 Неруйнівний контроль. Настанови щодо навчання, кваліфікації і сертифікації інженерів НК.

Новий формат конференції дав можливість зупинитися на обговоренні питань нормативно-

го забезпечення в сфері НК та практичного виконання вимог міжнародних стандартів. Представники освітньої галузі та органів сертифікації, які зібралися за круглим столом, намітили основні напрямки залучення можливостей вищої освіти для забезпечення підготовки спеціалістів неруйнівного контролю для подальшої сертифікації акредитованими органами оцінки відповідності, зокрема Центром сертифікації при УТ НКТД.

Чудові умови для роботи та проживання забезпечив персонал Центру навчання та відпочинку «Енергетик» в Наленчуві. Зручні конференц-зали, їх медійне забезпечення та оперативність персоналу Центру забезпечило успішну реалізацію насиченої програми конференції, а комфортні зони відпочинку та затишні прилеглі приміщення сприяли неформальному спілкуванню в кулуарах.

Учасники конференції отримали також унікальну можливість ознайомитись з дефектоскопічними новинками фірми OLYMPUS, насамперед з обладнанням для ультразвукового та вихрострумовеого контролю, які були представлені на виставці, що проходила паралельно з конференцією.

Цікавою була і позаконференційна програма. Учасники конференції здійснили дві екскурсії: по дорозі в Наленчув зі Львова відвідали місто на Віслі – Казимеж Дольни, а по дорозі додому зупинились у Любліні.

Активність, зацікавленість та схвальні відгуки учасників надихнули організаторів на проведення конференції і наступного року в такому ж форматі. Отож, колеги, чекаємо Вас в Наленчуві в жовтні 2018 року!

*Ю. М. Поситайко, С. О. Щупак*



## ПРЕДПРИЯТИЮ «УЛЬТРАКОН-СЕРВИС» 25 ЛЕТ

ООО «УЛЬТРАКОН-СЕРВИС» – один из национальных лидеров производства приборов неразрушающего контроля отмечает в 2018 г. 25-летний юбилей. В далеком 1993 г., с которого начинается его история, в Украине не существовало производителей средств неразрушающего контроля (НК). Понимая, что успешно конкурировать на современном рынке приборостроения можно только создавая новые высокотехнологичные проекты, основанные на последних достижениях науки и техники, предприятие берет курс на собственные научные разработки, а также изучение передовых технологий и новых разработок ведущих мировых производителей оборудования неразрушающего контроля.

Свой путь компания начинала в качестве предприятия по ремонту и обслуживанию импортных приборов НК. Своим рождением она обязана его бессменному руководителю, канд. техн. наук, члену-корреспонденту Транспортной академии Украины Геннадию Геннадьевичу Луценко. Творческий потенциал и квалификация ее работников, а также накопленный опыт позволили уже через 3 года реализовать свой первый собственный проект — производство ультразвуковых преобразователей. За ним последовала разработка микропроцессорного твердомера ТДМ-1. Этот прибор был представлен на выставке «Неразрушающий контроль-96», а уже с ноября этого года было налажено его серийное производство.

С 1996 г. ООО «УЛЬТРАКОН-СЕРВИС» становится организатором проведения международных конференций-выставок по проблемам неразрушающего контроля. В них принимают участие ведущие специалисты предприятий, использующие в своей работе технологии НК, а также научные работники, занимающиеся разработками в данной области.

Интерес, проявленный специалистами к участию в данных конференциях, стал свидетельством растущего авторитета компании «УЛЬТРАКОН-СЕРВИС» и признания ее заслуг на национальном рынке приборов и технологий неразрушающего контроля. В этих мероприятиях принимают участие специалисты и представители ведущих предприятий различных отраслей промышленности, научно-исследовательских институтов из ближнего и дальнего зарубежья. В работе пятая конференции-выставки, состоявшейся в 2001 г., приняли участие 400 специалистов в области неразрушающего контроля. Конференции становятся традиционными и ежегодно проводятся под эгидой ООО «УЛЬТРАКОН-СЕРВИС».

На сегодня «УЛЬТРАКОН-СЕРВИС» в составе группы компаний «Ассоциация «ОКО» регулярно

но принимает участие в конференциях по НК, организуемых Всемирным (ICNDT) и Европейским (EFNDT) обществами неразрушающего контроля, а также в региональных конференциях – Американского общества неразрушающего контроля (ASNT), Азиатско-Тихоокеанского общества (APCNDT) и др. Специалисты «УЛЬТРАКОН-СЕРВИС» активно сотрудничают с крупными научными организациями, имеющими многолетний опыт научных исследований и методик неразрушающего контроля. Сре-



Председатель общества НК и ТД Украины проф. Троицкий В. А. (слева) с молодым коллективом предприятия



Президент Национальной академии наук Украины Борис Евгеньевич Патон на стенде НПФ «УЛЬТРАКОН-СЕРВИС»



НПФ «УЛЬТРАКОН-СЕРВИС» 5 лет. Учредители (слева направо): Луценко Г. Г., Луценко Т. М., Чуприн В. А.

ди них – Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, а также немецкий Фраунгоферовский институт методов НК.

Научный и производственный потенциал компании постоянно растет, что находит свое выражение в выпуске новых образцов продукции. Сегодня их насчитываются десятки, поэтому можно привести примеры только некоторых из них. Это такие хорошо известные как в Украине, так и за ее пределами модели:

- ультразвуковые дефектоскопы УДЗ-71 и УД4-76 с версией TOFD;
- ультразвуковой дефектоскоп УД4-94-ОКО-01;

- вихретоковые дефектоскопы ВД-30НК-IVE, ВДЗ-71 НК-IVУ, ВД-131 НД, ВД-132-К-ШУ-ОКО-01 и ВД 3-81;
- магнитные дефектоскопы МД-01ПК III У, МД-4КМ, УниМАГ-01 и УМПК-200;
- многофункциональный ультразвуковой дефектоскоп SONOCON B;
- ультразвуковой дефектоскоп SONOCON FOCUS на фазированных решетках;
- комплекс дефектоскопический акустико-эмиссионный ГАЛС-1;
- вибродиагностический комплекс Ревизор-КП;
- толщиномеры ТУЗ-1, ТУЗ-2, ТУЗ-5, УТГ-8;
- твердомеры TDM-1 и TDM-2;
- установки автоматизированного контроля УМПК-39, УМПК-Ось-38, УМПК-2, САУЗК Унискан-Луч ОСЬ-4.



Заместитель директора ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, академик Л. М. Лобанов (в центре), директор НПФ «УЛЬТРАКОН-СЕРВИС», канд. техн. наук Луценко Г. Г. (слева), зав. отд. ИЭС им. Е. О. Патона, канд. техн. наук Бондаренко Ю. К. (справа) на презентации первого отечественного рельсового дефектоскопа УДС2-73



15-ти летний юбилей. Поздравляет мэтр советской дефектоскопии Гурвич А. К. (справа)



Празднование 20-летнего юбилея (справа налево): академик Белокур И. П., Луценко Г. Г., Луценко Т. М., генеральный директор «Ether NDE Limited» (UK) Майкл Райли

Важно отметить, что разработка оборудования ведется в тесном контакте с производителями и часто является результатом плодотворного сотрудничества в области решений стоящих перед ними конкретных задач.

Продукция компании широко используется во многих отраслях производственной деятельности. Тысячи ее приборов успешно работают на предприятиях железнодорожного, авиационного, трубопроводного транспорта, метрополитенах, авиационных заводах, предприятиях тепловой и атомной энергетики, металлургии, машиностроения, трубной и химической промышленности.

Специалисты ООО «УЛЬТРАКОН-СЕРВИС» могут решить как разовые проблемы заказчика, не связанные с необходимостью регулярного проведения НК, так и наладить регулярную работу службы неразрушающего контроля на предприятии, укомплектовав ее всем необходимым оборудованием, а также обучить и сертифицировать ее персонал. Философия компании состоит в том, что никто не организует проведение контроля лучше, чем авторы методик и разработчики приборов НК, именно поэтому «под одной крышей» собраны все специалисты – научные работники, методисты, разработчики и производители аппаратуры, преподаватели и эксперты.

Прекрасно понимая, что оборудование является лишь инструментом в руках человека, руководство компании прикладывает большие усилия для того, чтобы использование этого инструмента стало максимально эффективным. Любая ошибка в столь ответственном деле может обернуться трагедией. Поэтому, понимая всю меру ответственности как за результаты использования своего собственного оборудования, так и за проведение неразрушающего контроля в целом, еще в период своего становления предприятие принимает решение о создании собственного Учебного центра по подготовке специалистов в данной области.

В 2001 г. на базе НПФ «УЛЬТРАКОН-СЕРВИС» был открыт Учебный центр неразрушающего контроля (УЦНК), который получил Лицензию Министерства образования и науки Украины. Осуществление подготовки специалистов по НК I-III уровней квалификации проводится в соответствии с требованиями международных стандартов ISO 9712:2012 и EN 4179:2009 по вихретоковому, магнитопорошковому, капиллярному, ультразвуковому, визуальному, радиографическому, акустико-эмиссионному методам контроля

Таким образом, стратегия предприятия направлена на комплексное решение проблем неразрушающего контроля, которое включает научные исследования, собственные разработки новых образцов продукции, производство и новые технологии, подготовку специалистов. Именно поэтому ее девизом стало выражение «Технологии НК под ключ». Для достижения этой цели предприятие явилось инициатором создания компании «Ассоциация «ОКО», в состав которой вошли «УкрНИИНК» и «УЛЬТРАКОН-СЕРВИС».

Продукция «УЛЬТРАКОН-СЕРВИС» хорошо известна и пользуется заслуженным признанием не только в Украине, но и далеко за ее пределами. Предприятие вышло на рынок более 30 государств как ближнего, так и дальнего зарубежья, и успешно конкурирует с самыми известными зарубежными фирмами-производителями дефектоскопического оборудования.

В год своего 25-летнего юбилея НПФ «УЛЬТРАКОН-СЕРВИС» с уверенностью смотрит в будущее. Прочный фундамент в виде мощной производственной базы, высокого уровня профессиональной подготовки, признанных во всем мире результатов научных разработок, а самое главное, сплоченного коллектива единомышленников, готовых к решению любых поставленных задач, служат гарантией новых свершений и творческих побед.

Благодаря достигнутым успехам, НПФ «УЛЬТРАКОН-СЕРВИС» заслуженно занимает ведущее место в области неразрушающего контроля в Украине, ближнем и дальнем зарубежье.

## НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ-2018

конференция-выставка, 16–17 мая 2018, г. Киев

Группа компаний «Ассоциация «ОКО» традиционно проводит ежегодную конференцию-выставку целью которой является обмен опытом в области неразрушающего контроля, информирование участников о новых методических разработках, перспективных путях сотрудничества в сфере создания новой техники и технологий, а также установления новых деловых и коммерческих контактов.

Конференция приурочена к 25-летию юбилею НПФ «Ультракон-сервис». В программе будут представлены новые разработки в области технологий неразрушающего контроля по следующим направлениям:

- железнодорожный транспорт (вагонное, локомотивное и путевое хозяйство)
- атомная и тепловая энергетика
- нефтегазовая отрасль и трубопроводный транспорт
- авиастроение и техническое обслуживание летательных аппаратов
- металлургия
- машиностроение
- организация обучения и сертификации персонала по неразрушающему контролю металлических материалов в соответствии с международными стандартами

Предусмотрено обсуждение участниками конференции докладов и выступлений по актуальным проблемам неразрушающего контроля.

На специализированной выставке, которая будет проведена во время конференции производственные предприятия группы компаний «Ассоциация «ОКО» среди которых НПФ «Ультракон-сервис», НПФ «Промприлад», УкрНИИНК (Украинский научно-исследовательский институт неразрушающего контроля) познакомят посетителей с новыми образцами своей продукции.

Участие в конференции будет полезным для наших постоянных партнеров, а для тех, кто посетит ее впервые – станет началом плодотворного и взаимовыгодного сотрудничества.

В завершение конференции пройдут торжественные мероприятия, посвященные юбилею НПФ «Ультракон-сервис».

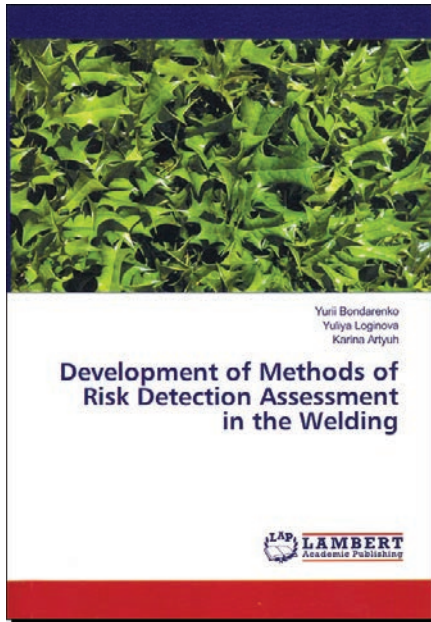
Место проведения конференции:  
г. Киев, ул. Набережно-Луговая, 8.  
[www.ndt.com.ua/conf](http://www.ndt.com.ua/conf)

Оргкомитет:  
тел./факс: +38 (044) 531-37-27, 531-37-26  
Кубрак Лилия Нугзаровна  
E-mail: [lia-lia\\_2004@mail.ru](mailto:lia-lia_2004@mail.ru)  
моб.: +38 (067) 858-98-53



НОВА КНИГА

**РОЗРОБКА МЕТОДІВ РОЗПІЗНАВАННЯ РИЗИКІВ У ЗВАРЮВАЛЬНОМУ ВИРОБНИЦТВІ** (англ. мовою). *Ю. Бондаренко, Ю. Логінова, К. Артюх.*  
LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. ISBN: 978-620-2-07171-0.



**ЗМІСТ**

Розділ 1. Аналіз та дослідження існуючих підходів і методів виявлення та управління ризиками на підприємстві зварювального виробництва, що здійснюють виготовлення та монтаж конструкцій.

Розділ 2. Розробка методики оцінки розпізнавання ризиків в зварювальному виробництві, створення реєстру і ранжування ризиків в зварних конструкціях за допомогою НК і ТД.

Розділ 3. Технологічне управління якістю та експлуатаційними властивостями виробів в зварювальному виробництві.

Розділ 4. Проблеми забезпечення прийому і мотивації технічних експертів в зварювальному виробництві.

Розділ 5. Розробка методики оцінки розпізнавання ризиків в зварювальному виробництві. Створення реєстру і ранжування ризиків в зварних конструкціях.

Розділ 6. Проблеми розвитку системи технічного регулювання по НК і ТД та зварювання конструкцій.

Розділ 7. Проблеми підвищення якості виконання технічних послуг при монтажі та діагностиці в енергетиці з метою забезпечення безпеки зварних конструкцій.

Розділ 8. Проблеми забезпечення якості та оцінки зварних конструкцій на основі нових стандартів і технічних регламентів.

Розділ 9. Моніторинг ризику утворення дефектів в зварних з'єднаннях при виконанні ремонту і монтажу зварюванням в захисних газах.

Розділ 10. Дослідження принципів управління ризиками для якості в зварювальному виробництві.

Розділ 11. Оцінка ризику експлуатації зварних конструкцій на підставі моніторингу процесів системи управління якістю і проведення випробувань методами НК і ТД.

Talk about the fourth industrial revolution or «industry 4.0» was held in Davos since 2011. At that time, an active discussion of the new technological era, which essentially minimizes the contribution of human labor to production processes, and also significantly simplifies life at the household level by the expense of «smart» gadgets and solutions. Today, the turning point of the new industrial era is never closer. For example, the founder of the Davos forum, Klaus Schwab, is convinced that in the near future the world will be captured by artificial intelligence. The need to improve the efficiency of the enterprise (increase productivity, reduce costs, improve quality) makes it necessary to develop effective methods of management and to introduce requirements of quality system standards, moving from the control of finished products (phased control as one of the methods of technical maintenance of functioning) to a process management approach. The requirements of the standards of the quality management system develop in accordance with the requirements of the development of scientific management methods, management system standards and use the concept of risk-based thinking.

Подписано к печати 20.03.2018. Формат 60×84/8. 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.