

**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. Питула** (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. полит. ин-т им. Игоря Сикорского», Киев  
д.т.н. **М. Г. Чаусов**  
Нац. ун-т биорес. и природопольз. Украины, Киев

*Зарубежные ученые*  
д.т.н. **Н. П. Алешин**  
МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, РФ  
д.т.н. **В. Л. Венгринович**  
Ин-т прикл. физики, Минск, Республика Беларусь  
д.т.н. **В. В. Клюев**  
ЗАО НИИИМ 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/dnkn

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

**СОДЕРЖАНИЕ**

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ**

**ТОРОП В. М., МАХНЕНКО О. В., САПРЫКИНА Г. Ю., ГОПКАЛО Е. Е.** Результаты исследований причин образования трещин в лопатках из титанового сплава паровых турбин типа К-1000-60/3000 ..... 3

**ЛОБАНОВ Л. М., ПИВТОРАК В. А.** Оперативный контроль качества и напряженного состояния сварных панелей из сплава ВТ-20 методами цифровой ширографии и спекл-интерферометрии ... 16

**ПЛЕСНЕЦОВ С. Ю., СУЧКОВ Г. М., КОРЖ А. И., СУВОРОВА М. Д.** Новые теоретические исследования и разработки в области электромагнитно-акустического преобразования (Обзор) ..... 24

**КУЦ Ю. В., ЛЫСЕНКО Ю. Ю., РЕДЬКА М. А., БЛИЗНЮК Е. Д.** Применение круговых статистик для обнаружения сигнала ультразвукового неразрушающего контроля ..... 32

**ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ**

**ТРОИЦКИЙ В. А.** Объективный и производительный визуальный контроль протяженных металлоконструкций ..... 37

**ЯСКОВЕЦ З. С., ОРЫНЯК И. В.** Мониторинг и расчет напряженного состояния подземных магистральных газопроводов в зонах шахтных выработок ..... 45

**МАНОРИК П. А., ШУЛЬЖЕНКО А. В., КУКЛА А. Л., ФЕДЧЕНКО А. Н., ПОСЫПАЙКО Ю. Н., ГРЕБЕННИКОВ В. М., СОТНИК С. А.** Оптоэлектронный сенсорный течейскаатель для детектирования утечек аммиака ..... 53

**ВЕРЕНЕВ В. В., БАГЛАЙ А. В., БЕЛОДЕДЕНКО С. В.** Вопросы вибрационного диагностирования оборудования прокатных станов ... 59

**ПЕРЕПИЧАЙ И. И., ПЕРЕПИЧАЙ А. А., МУТАС В. В., РАБКИНА М. Д.** Моделирование возможности развития трещиноподобных дефектов в сосудах давления из двухслойных сталей .... 63

**УЧАНИН В. Н.** Предложения по совершенствованию классификации вихретоковых преобразователей ..... 69

**ХРОНИКА**

Конференция «Неразрушающий контроль-2018» ..... 76

**ИНФОРМАЦИЯ**

Премия им. академика НАН Украины И. К. Походни ..... 36

Поздравляем лауреатов Государственной премии Украины в области науки и техники ..... 44

Новые книги ..... 74

XXII Международная конференция «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики» ..... 75

**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

<i>ТОРОП В. М., МАХНЕНКО О. В., САПРИКІНА Г. Ю., ГОПКАЛО Е. Е.</i> Результати досліджень причин утворення тріщин в лопатках з титанового сплаву парових турбін типу К-1000-60/3000 .....	3
<i>ЛОБАНОВ Л. М., ПИВТОРАК В. А.</i> Оперативний контроль якості і напруженого стану зварних панелей зі сплаву ВТ-20 методами цифрової широкорафії і спекл-інтерферометрії .....	16
<i>ПЛЕСНЕЦОВ С. Ю., СУЧКОВ Г. М., КОРЖ А. І., СУВОРОВА М. Д.</i> Нові теоретичні дослідження і розробки в галузі електромагнітно-акустичного перетворення (Огляд) .....	24
<i>КУЦЬ Ю. В., ЛИСЕНКО Ю. Ю., РЕДЬКА М. О., БЛИЗНЮК О. Д.</i> Застосування кругових статистик для виявлення сигналу ультразвукового неруйнівного контролю .....	32

### ВИРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ

<i>ТРОЙЦЬКИЙ В. О.</i> Об'єктивний та продуктивний візуальний контроль протяжних металоконструкцій .....	37
<i>ЯСКОВЕЦЬ З. С., ОРІНЯК І. В.</i> Моніторинг та розрахунок напруженого стану підземних магістральних газопроводів в зонах шахтних виробок .....	45
<i>МАНОРИК П. А., ШУЛЬЖЕНКО О. В., КУКЛА О. Л., ФЕДЧЕНКО О. М., ПОСИПАЙКО Ю. М., ГРЕБЕННИКОВ В. М., СОТНИК С. О.</i> Оптикоелектронний сенсорний течошукач для детектування витоків амоніаку .....	53
<i>ВЕРЕНЕВ В. В., БАГЛАЙ А. В., БЕЛОДЕДЕНКО С. В.</i> Питання вібраційного діагностування обладнання прокатних станів .....	59
<i>ПЕРЕПІЧАЙ І. І., ПЕРЕПІЧАЙ А. О., МУТАС В. В., РАБКІНА М. Д.</i> Моделювання можливості розвитку тріщиноподібних дефектів у посудинах тиску з двохшарових сталей .....	63
<i>УЧАНІН В. М.</i> Пропозиції щодо вдосконалення класифікації вихрострумів перетворювачів .....	69

### ХРОНІКА

Конференція «Неруйнівний контроль-2018» .....	76
---	----

### ІНФОРМАЦІЯ

Премія ім. академіка НАН України І. К. Походні .....	36
Поздоровляємо лауреатів Державної премії України в галузі науки і техніки .....	44
Нові книги .....	74
XXII Міжнародна конференція «Сучасні методи та засоби неруйнівного контролю і технічної діагностики» .....	75

#### 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

## CONTENTS

### SCIENTIFIC-TECHNICAL

<i>TOROP V. M., MAKHNENKO O. V., SAPRYKINA G. Yu., GOPKALO E. E.</i> Results of studying the causes for cracking in titanium alloy blades of steam turbines of K-1000-60/3000 type .....	3
<i>LOBANOV L. M., PIVTORAK V. A.</i> Operational control of the quality and stressed state of welded panels from VT-20 alloy by digital shearography methods .....	16
<i>PLESNETSOV S. Yu., SUCHKOV G. M., KORZH A. I., SUVOROVA M. D.</i> New theoretical investigations and developments in the field of electromagneto-acoustic transformation (Review) .....	42
<i>KUTS Yu. V., LYSENKO Yu. Yu., RED'KA M. O., BLIZNYUK O. D.</i> Application of circular statistics for detection of signals of ultrasonic nondestructive testing .....	32

### INDUSTRIAL

<i>TROITSKII V. A.</i> Objective and efficient visual control of extended metal structures .....	37
<i>YASKOVETS S. Z., ORINYAK I. V.</i> Monitoring and calculation of stressed state of underground main gas pipelines in mine working zones .....	45
<i>MANORIK P. A., SHULZHENKO O. V., KUKLA O. L., FEDCHENKO O. M., POSYPAIKO Yu. M., GREBENNIKOV V. M., SOTNIK S. O.</i> Optoelectronic sensor leak detector for detection of ammonia leaks .....	53
<i>VERENEV V. V., BAGLAI A. V., BELODEDENKO S. V.</i> Issues of vibration diagnosis of rolling mill equipment .....	59
<i>PEREPICHAI I. I., PEREPICHAI A. O., MUTAS V. V., RABKINA M. D.</i> Modeling the possibility of propagation of cracklike defects in pressure vessels from two-layer steels .....	63
<i>UCHANIN V. M.</i> Propositions on improvement of the classification of eddy current transducers .....	69

### NEWS

Conference «Non-Destructive Testing-2018» .....	76
---	----

### INFORMATION

The Prize of I.K. Pokhodnya, academician of the NAS of Ukraine .....	36
Congratulations for laureates of the State Prize of Ukraine in the field of science and technology .....	44
New books .....	74
XXII International conference «Modern methods and means nondestructive control and technical diagnosis» .....	75

#### 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

# РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИЧИН ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИН В ЛОПАТКАХ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ПАРОВЫХ ТУРБИН ТИПА К-1000-60/3000

**В. М. ТОРОП<sup>1</sup>, О. В. МАХНЕНКО<sup>1</sup>, Г. Ю. САПРЫКИНА<sup>1</sup>, Е. Е. ГОПКАЛО<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 проблем прочности им. Г. С. Писаренка НАН Украины. 01014, г. Киев, ул. Тимирязевская, 2.  
E-mail: info@ipp.kiev.ua

В статье представлены результаты исследований причин образования трещин в лопатках последней ступени паровых турбин К-1000-60/3000, эксплуатирующихся на АЭС Украины. Основные причины, физическая сущность формирования и накопления эрозионной повреждаемости поверхности лопаточных материалов в результате высокоскоростного каплеударного воздействия переохлажденного пара до настоящего времени остаются недостаточно изученными. При выполнении работы был проведен комплекс исследований структуры, химического состава и механических свойств материала лопатки. Выполнены морфологические и фрактографические исследования поверхности трещины. По результатам этих исследований сформулированы выводы о причинах возникновения дефектов и о возможности прогнозирования остаточного ресурса лопаток. Библиогр. 9, табл. 3, рис. 23.

*Ключевые слова:* эрозионная повреждаемость, трещины, лопатка паровой турбины, морфологические и фрактографические исследования, химический состав, механические свойства, титановый сплав ТС5

На АЭС Украины находятся в эксплуатации пять мощных паровых турбин типа К-1000-60/3000 (рис. 1), сроки эксплуатации которых превышают назначенный производителем ресурс безопасной эксплуатации. Лопатки последних ступеней турбины работают в условиях высоких каплеударных нагрузок, что приводит к интенсивному эрозионному износу (разрушению) их входных кромок [1, 2, 4–6]. Проведение комплексного анализа работоспособности рабочих лопаток из титанового сплава для пятой ступени цилиндра низкого давления (ЦНД) паровой турбины (рис. 2), продление ресурса эксплуатации и отсрочка их замены может обеспечить значительную экономию средств.

До настоящего времени остаются недостаточно изученными основные причины, физическая сущность формирования и накопления эрозионной повреждаемости поверхности лопаточных материалов в результате высокоскоростного каплеударного воздействия переохлажденного пара.

Известно, что эрозия возрастает по мере увеличения длины и окружной скорости лопаток и, следовательно, по мере увеличения скорости соударения с частицами капель пара от 300 до 600 м/с. Во время эксплуатации паровых лопаток интенсивность нарастания скорости эрозии немонотонна. Различают три типичных этапа протекания процессов эрозии (глубины эрозионного износа) во времени. На первом этапе, в так называемом инкубационном периоде, видимых повреждений поверхности нет, потерь массы материала зафиксировать не удается. В ряде работ

показано, что на первом этапе эрозии материала предшествует рост микронапряжений и увеличение в металле лопатки плотности дислокаций предельного значения  $10^{12} \dots 10^{13} \text{ см}^{-1}$  [2]. Второй этап характеризуется тем, что имеет место максимальная скорость эрозии и в течение этого отрезка времени она остается практически постоянной. На третьем этапе, по различным причинам эрозия ослабевает.

В литературе известны лишь качественные объяснения вида кинетической кривой износа, основанные на представлениях об изменении характера взаимодействия между каплями и поверхностью в результате изменений рельефа эродированной поверхности. Согласно этим представлениям по истечении инкубационного периода (первого этапа износа) на поверхности с высокой скоростью появляются и накапливаются



Рис. 1. Паровая турбина К-1000-60/3000 для энергетических реакторов ВВЭР-1000

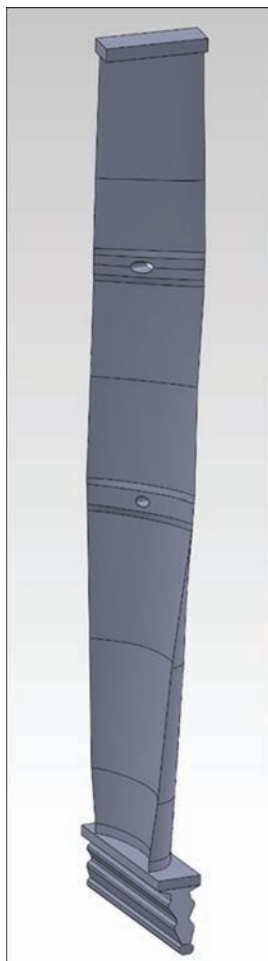


Рис. 2. Общий вид рабочей лопатки пятой ступени цилиндра низкого давления (ЦНД) паровой турбины типа К-1000-60/3000

разрушения, возрастает глубина впадин (второй этап износа). Далее, когда углубления впадин достигают нескольких диаметров капель, заостряются перемычки между кавернами, поверхность приобретает «сотовую» и иглообразную форму, типичную для эрозии турбинных лопаток, происходит уменьшение скорости износа (третий этап износа) [2].

Также известно, что сплавы на основе титана по сравнению со сталями, обладают более высокой стойкостью к ударным нагрузкам [6]. В последние годы ведутся разработки методических подходов, которые позволили бы адекватно характеризовать каплеударное воздействие частиц пара, формирующих ударную волну в объеме титановых лопаток, и проводить количественную оценку эрозионного повреждения с учетом волновой природы пластической деформации [4, 5]. Есть положительные результаты в разработке кавитационно-устойчивых защитных покрытий рабочих лопаток из титанового сплава [6].

Таким образом, проблема анализа причин разрушения рабочих лопаток из титановых сплавов паровых турбин, оценки и продления ресурса их безопасной эксплуатации достаточно актуальна.

**Цель исследования.** В работе проведено исследование причин возникновения дефектов и появления трещины в лопатке № 74 пятой ступени правого потока турбины ЦНД энергоблока №1 ОП «Хмельницкая АЭС» и сопоставление результатов с данными, полученными на лопатке № 73, отработавшей аналогичный срок эксплуатации более 180 тыс. ч, но не имеющей явных следов трещинообразования.

Фотографии входной кромки рабочей лопатки № 74 пятой ступени ЦНД из титанового сплава TC5 со следами эрозионного износа, отработавших более 180 тыс. ч представлены на рис. 3.

В процессе выполнения работы был проведен комплекс исследований химического состава и механических свойств материала данной лопатки, металлографический и фрактографический анализы. По результатам выполненных исследований сформулированы выводы по причинам возникновения дефектов и прогнозированию остаточного ресурса лопаток.

**Материалы и методика исследований.** Образцы (темплеты) для металлографических исследований вырезались из входных кромок эродированных лопаток № 74 и № 73 паровой турбины с резами в двух взаимно перпендикулярных сечениях, согласно схеме, представленной на рис.4. Плоскости 1 и 2 – соответствуют поперечному и продольному сечениям лопатки. Направление движения ударной волны, формируемой каплями пара, совпадало с направлением 3. Причем из участка лопатки № 74 с обнаруженной трещиной был вырезан образец (темплет) по всей толщине лопатки размером 15×20 мм. Для сравнения из участка лопатки № 73 с максимальным эрозионным износом (поскольку трещины в лопатке № 73 не обнаружены) также был вырезан образец по всей толщине лопатки.

Для определения химической неоднородности в различных зонах лопатки металлографическим

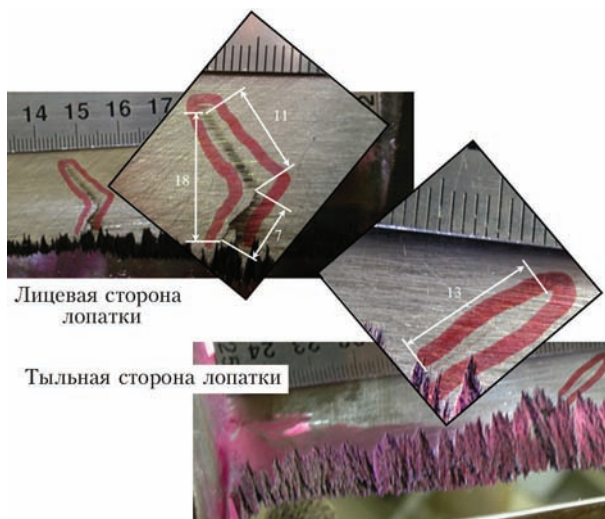


Рис. 3. Эрозионный износ входной кромки рабочей лопатки № 74 пятой ступени ЦНД из титанового сплава TC5, отработавшей более 180 тыс. ч

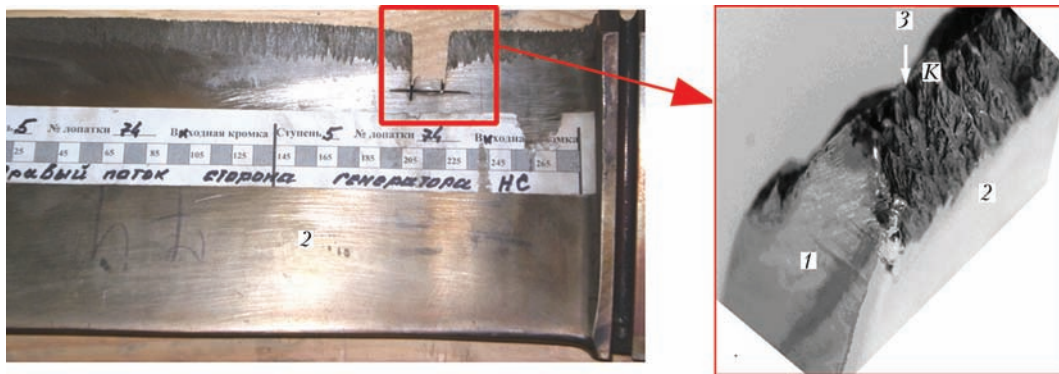


Рис. 4. Схема вырезки темплета для изучения микроструктуры материала лопаток: 1 – поперечное сечение лопатки; 2 – продольное сечение лопатки; 3 – направление движения ударной волны, формируемой каплями пара; К – входная кромка лопатки со следами эрозионного износа

методом были проведены исследования на рентгено-спектальном локальном анализаторе «КАМЕ-БАКС» французской фирмы «КАМЕКА» модели SX-50 с зондом 1...2 мкм и ошибкой определения легирующих элементов 2...5 % от измеряемой величины. Это позволяет определять состав всех легирующих элементов в объеме 1 мкм<sup>3</sup>. При этих исследованиях пользовались методиками фирмы «КАМЕКА», алгоритмы которых реализованы в вычислительной машине установки PDP 11/73.

Металлографический анализ структурных составляющих материала лопаток из титанового сплава TC5 после каплеударного нагружения и фрактографические исследования поверхности раскрытой трещины проводили с помощью сканирующего растрового электронного микроскопа (РЭМ) CAMSCAN-4, оснащенного детектором фазового контраста и системой энергодисперсионного локального анализа EDX 200. Микрошлифы для структурного и рентгеноспектрального анализа готовили по стандартной методике с использованием шлифовально-полировального оборудования фирмы Struers.

**Исследование структуры и химического состава материала лопатки (сплав TC5).** После изготовления микрошлифов в режиме фазового контраста исследовали микродефекты и микроструктуру мате-

риала лопатки как вдали от эрозионно разрушенного гребня, так и в районе образования трещин, и в районе гребня с эрозионным разрушением вплоть до вершинок и сторон пирамидальных образований, где выявлено наличие мельчайших микротрещин длиной 1...2 мкм и толщиной до 1 мкм.

Установлено, что сплав титановой лопатки представляет собой структуру с α и β составляющими и других фаз не выявлено. Каких-либо структурных изменений и новообразований в зонах эрозии, в районах трещин и в основном металле не обнаружено.

Химический состав сплава TC5 для лопаток № 73 и № 74 приведен в табл. 1.

Локальный химический анализ металла лопаток различных зон свидетельствует об уменьшении α-стабилизатора, т. е. содержание Al несколько ниже требований документа [7], и увеличении β-стабилизатора, т. е. содержание V выше тре-

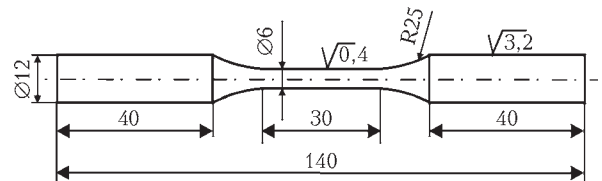


Рис. 5. Образец (тип VII) для определения механических свойств [8]

Таблица 1. Химический состав сплава TC5 для лопаток № 73 и № 74

Химический элемент	Исследуемый сплав лопатки				
	TC5 [6]	№ 74 <sup>1</sup>	№ 74 <sup>2</sup>	№ 73 <sup>3</sup>	№ 73 <sup>4</sup>
Fe	< 0,13	< 0,1	–	–	–
Al	4,5...6,0	3,64...4,79	4,29...4,61	4,72...4,85	4,72...4,83
Mn	0,15	–	–	–	–
V	1,5	2,1...2,4	1,64...2,27	1,86...2,39	2,19...2,37
Si	< 0,1	3,1	–	–	–
O	0,12	0,051	–	–	–
N	0,05	0,0050	–	–	–
H	0,01	0,0115	–	–	–
Sn	2,5...4,0	3,1	2,91...3,42	3,09...3,54	3,21...3,38
Ti	Основа				

Примечание: 1 – химический состав определен с применением аппарата Camebaks; 2 – химический состав определен с применением аппарата Camscan-4; 3 – химический состав на поверхности 2 определен с применением аппарата Camscan-4; 4 – химический состав на поверхности 3 определен с применением аппарата Camscan-4.

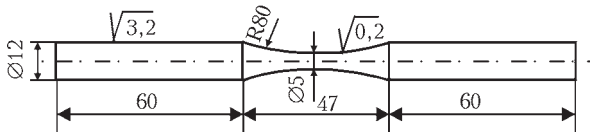


Рис. 6. Образец (тип I) для определения предела выносливости сплава TC5 [9]

бований [7], а также о повышенном содержании водорода на поверхности, прилегающей к «игло-видному» эрозионному повреждению и равному 0,0115 % при норме не более 0,01 %.

**Механические свойства материала лопатки (сплав TC5).** Для определения механических свойств сплава TC5 в зоне максимального накопления усталостных повреждений из темплета (лопатка № 74) были изготовлены образцы для контроля возможной деградации механических свойств металла лопатки.

Испытания для определения механических свойств при статической нагрузке титанового сплава TC5 проводили в соответствии со стандартом [8]. Образец для определения механических свойств показан на рис. 5.

Статическое нагружение проводили при постоянной скорости перемещения захвата испытательного оборудования, равной 4 мм/мин. После достижения 1 % остаточных деформаций рабочей части образца скорость нагружения составляла 8 мм/мин. База деформометра, установленного на рабочей части образца – 25 мм, а база измерения остаточного удлинения равна расчетной длине образца 30 мм. Температура испытаний 20...25 °С.

Испытания на усталость образцов корсетного типа (рис. 6) проводили в соответствии со стандартом [9]. Испытания на циклическую долговечность проводили в мягком режиме по синусоидальной форме (рис. 7) с постоянной амплитудой нагружения при асимметрии цикла  $R_\sigma = -1$ .

Критерием окончания проведения испытаний являлось разрушение образца, появление микро (макро) трещины или достижение  $10^7$  циклов.

Все испытания проводились на испытательной машине MTS 810 с максимальной нагрузкой 250 кН. Протокол испытаний представлен в

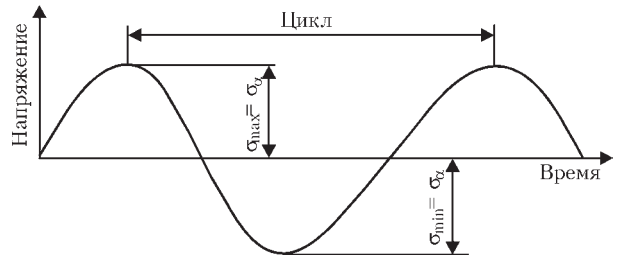


Рис. 7. Характеристика циклического нагружения

табл. 2, а механические свойства сплава TC5 – табл. 3.

Характерные диаграммы деформирования, полученные при испытании образцов номер 1–3, представлены на рис. 8.

Как следует из анализа полученных данных (табл. 3 и рис. 8), экспериментально определенные механические свойства сплава TC5 лопатки № 74 соответствуют требованиям нормативного документа [7].

По результатам проведенных усталостных испытаний было установлено, что при заданных напряжениях цикла разрушение образцов номер 4...6 не наблюдалось после достижения  $10^7$  циклов переменного нагружения, а значит, предел выносливости материала лопаток составляет  $\sigma_{-1} > 350$  МПа. С целью проведения фрактографических исследований образец номер 6 был разрушен после достижения  $N = 6\ 089\ 482$  циклов нагружения.

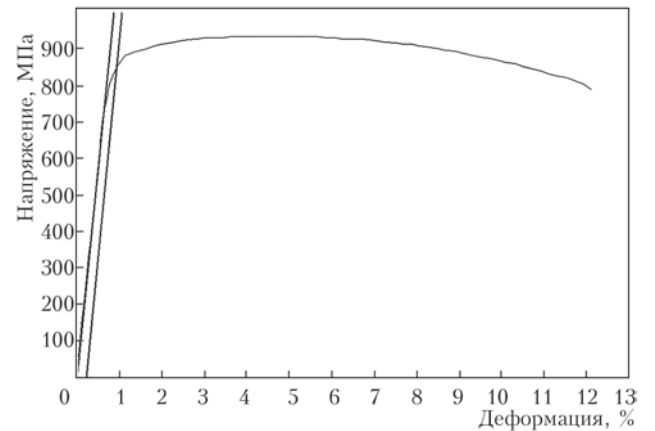


Рис. 8. Диаграммы деформирования при испытании образцов

Таблица 2. Протокол испытаний для определения механических свойств при статическом и циклическом нагружении образцов из титанового сплава TC5

Испытательная машина	База деформометра $L_{E0}$ , мм	База измерения $\delta_s$ , мм	Скорость нагружения для определения			$T_{исп.}$ , °С
			$\sigma_{0,2}$ , мм/мин	$\sigma_B$ , мм/мин	$\sigma_{-1}$ , Гц	
MTS 810	25	30	4	8	20	20...25

Таблица 3. Механические свойства сплава TC5 лопатки № 74

Номер образца	Диаметр, мм	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$P_{max}$ , Н	$\delta$ , %	$\psi$ , %	$\sigma_{-1}$ , МПа
1	6,05	920	838	14113	11	30	–
2	6	920	845	14308	12	30	–
3	6	911	832	13997	10	28	–
4-6	5	–	–	–	–	–	> 350
По [7]	–	$\geq 830$	750..900	–	$\geq 8$	$\geq 20$	350...460

**Морфология эродированной поверхности лопаток № 74 и № 73.** На входных кромках исследуемых лопаток наблюдается неравномерный пилообразный эрозионный износ металла (см. рис. 3 и 9).

На рис. 9 представлен фрагмент входной кромки лопатки № 73 со следами эрозионного износа с противоположных (продольные плоскости 2 на рис. 4) сторон пера лопатки – параллельно и перпендикулярно направлению движения ударной волны, формируемой каплями пара. На рис. 10 по-

казана микроструктура эродированной поверхности рабочих лопаток № 74 и № 73.

Морфология эродированной поверхности лопаток паровых турбин представляла собой «сотовую» форму, состоящую из глубоких каверн с заостренными перемычками в виде пирамидальных элементов с расстоянием между ними 400...700 мкм.

Характерным является то, что на участке лопатки № 74 с трещиной (рис. 11), наблюдаются еще и многочисленные микротрещины, а для лопатки № 73 такие микротрещины в устьях эродированных поверхностей не обнаружены (рис. 12).

Вероятно это объясняется тем, что при длительной эксплуатации происходящие процессы распада (уменьшение количества) обедненной  $\beta$  – стабилизаторами ОЦК  $\beta$ - фазы и, соответственно, обогащения ванадием и усиление искажения ГПУ-решетки  $\alpha$ - фазы способствуют торможению ударной волны, вызванной каплеударной эрозией поверхности лопатки, что в свою очередь приводит к локализации пластических деформаций и торможению микротрещин.

Однако на некоторых участках под поверхностью вблизи границ двух соседних оснований пирамидальных элементов лопатки № 73 наблюдались зародышевые «иглообразные» микротрещины в плоскости 1, и «подковообразные» в плоскости 2 (рис. 13), которые, вероятно, при своем раскрытии приводили к локальному разрушению.

Закономерная периодичность в формировании зародышевых микротрещин и пирамидальных

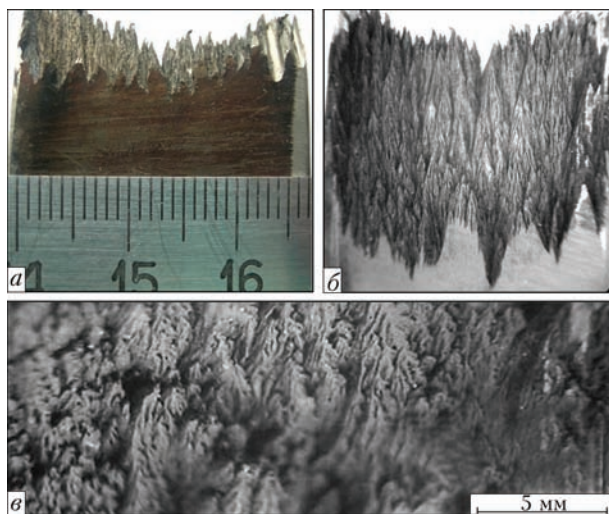


Рис. 9. Фрагмент входной кромки лопатки № 73 со следами эрозионного износа: тыльная сторона лопатки (а), лицевая сторона лопатки (б) – параллельная направлению движения ударной волны, формируемой каплями пара и сторона лопатки, перпендикулярная направлению движения ударной волны, формируемой каплями пара (в)

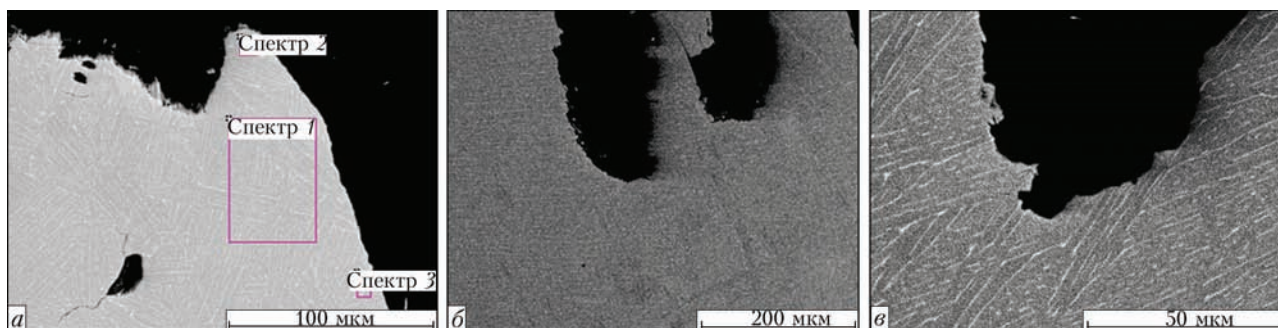


Рис. 10. Микроструктура эродированной поверхности рабочей лопатки № 74 (а) и № 73 (б, в)

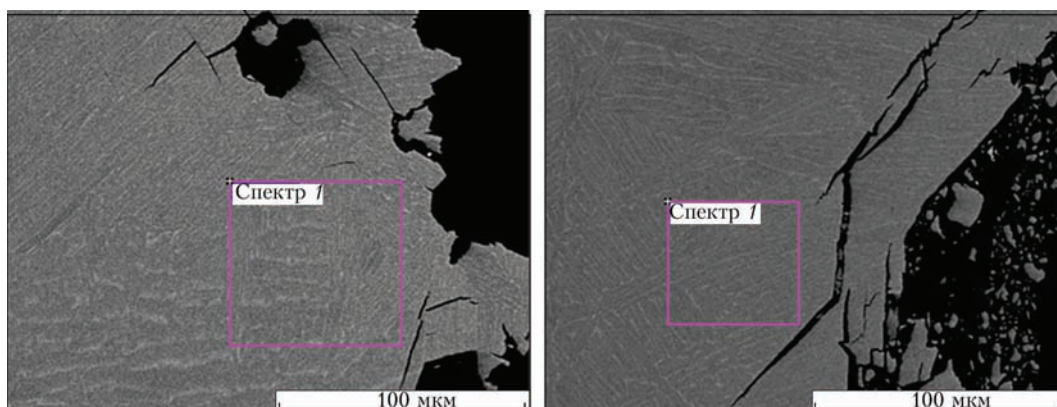


Рис. 11. Зародышевые микротрещины вблизи эродированной поверхности рабочей лопатки № 74

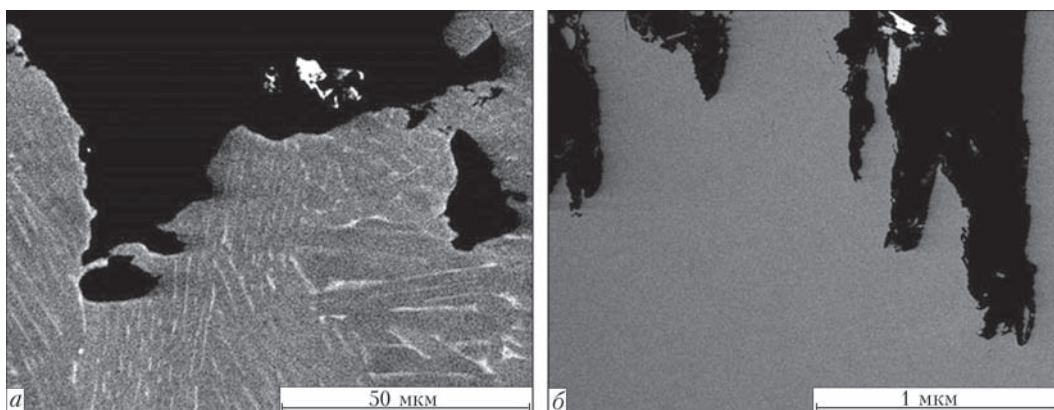


Рис. 12. Микроструктура поверхности рабочей лопатки № 73 вблизи эродированной поверхности в плоскостях 2 (а) и 1 (б) (номера плоскостей см. на рис. 4)

элементов на поверхности лопаток, свидетельствовали о разбиении материала при ударе на мезообъемы размером 400...700 мкм и о локализации пластической деформации и разрушении вдоль их границ раздела.

**Структура материала лопаток № 74 и № 73.**

Титановый сплав TC5 относится к псевдо- $\alpha$ -сплавам (коэффициент  $\beta$ -стабилизации  $K_\beta = 0,13$ ) с низким содержанием второй фазовой составляющей ( $\beta$ -фазы 2...5 %). Сплав обладает довольно хорошими технологическими свойствами при металлургическом переделе, высокой коррозионной стойкостью и хорошей свариваемостью.

Полное полиморфное превращение в  $\beta$ -состояние (с ОЦК решеткой) сплав достигает при температуре  $T_{\text{пп}} = 1020$  °С. По своим теплофизическим параметрам исследуемый сплав можно отнести к категории материалов с низкой плотностью (высокой удельной прочностью), низкой теплопроводностью, низкой энергией дефектов упаковки. Как известно, такие материалы подвергаются сильному деформационному упрочнению, а последующие релаксационные процессы вызывают разупрочнение в значительной мере за счет процессов рекристаллизации, что обусловлено малой вероятностью прохождения процессов полигонизации.

После изготовления микрошлифов по общепринятой методике в режиме фазового контраста исследовали микродефекты и микроструктуру материала лопатки как вдали от эрозийно разрушенного гребня, так и в районе образования трещин, и в районе гребня с эрозийным разрушением вплоть до вершинок и сторон пирамидальных образований, где обнаружено наличие мельчайших микротрещин длиной 1...2 мкм и толщиной до 1 мкм.

Микроструктура материала лопаток № 73 и № 74 непосредственно под эродированной поверхностью как в плоскости 1, так и в плоскости 2 (см. рис. 4) представляет колонии параллельных пластин  $\alpha$ -фазы (толщина которых составляет 2...4 мкм), лежащих в пределах границ исходных (превращенных) зерен  $\beta$ -фазы и незначительного количества пересекающих их тонких пластин  $\beta$ -фазы (рис. 10–13).

Дефектов металлургического, технологического и эксплуатационного характера на поверхности подготовленных образцов, вырезанных вдоль и поперек оси лопатки, не обнаружено.

На фотографиях микроструктуры хорошо видны приповерхностные микротрещины (рис. 14), которые, вероятно, сформировались еще в инкубационном периоде, когда видимого разрушения поверхности еще не было. Как показали исследования, в направлении, перпендикулярном движению ударной

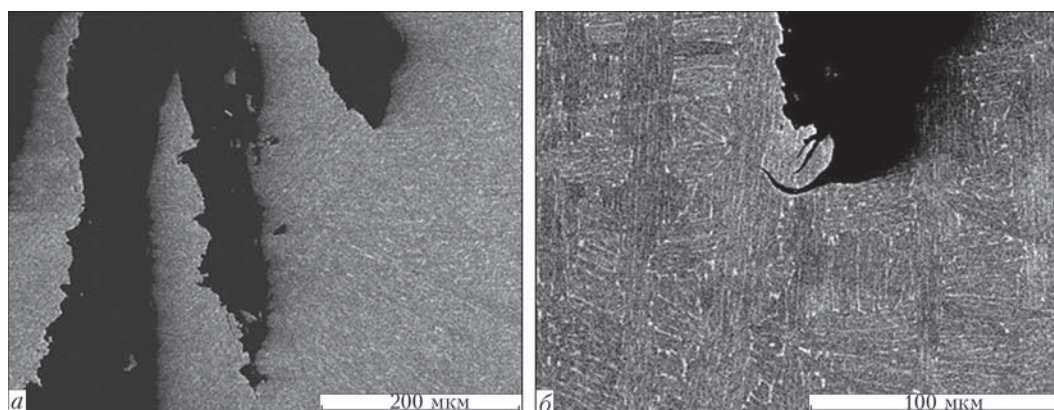


Рис. 13. Зародышевые микротрещины вблизи эродированной поверхности рабочей лопатки № 73 в плоскостях 1 (а) и 2 (б) (номера плоскостей см. на рис. 4).



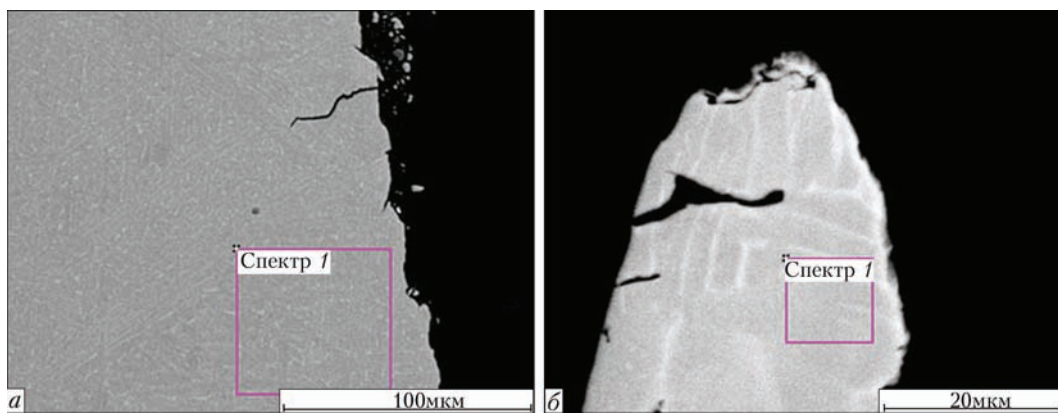


Рис. 14. Микроструктура металла лопатки № 74 из сплава TC5 непосредственно под эродированной поверхностью в плоскости 1

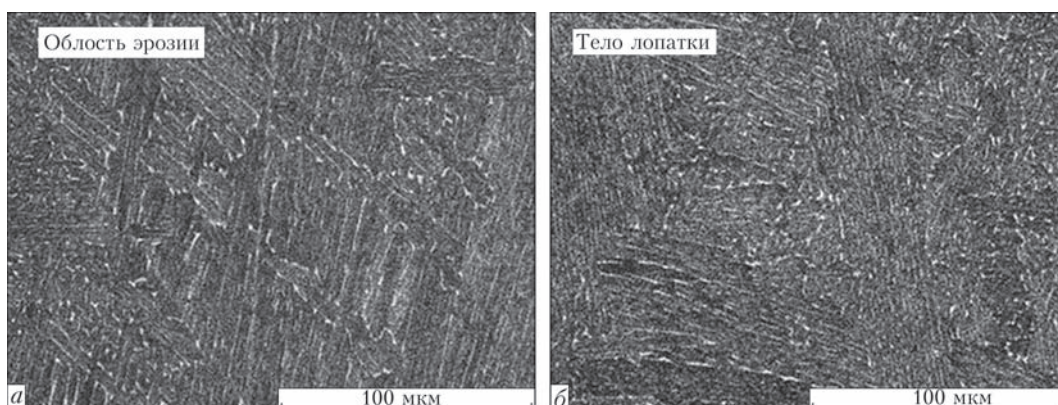


Рис. 15. Микроструктура металла лопатки № 73 из сплава TC5 непосредственно под эродированной поверхностью – область эрозии (а) и в теле лопатки плоскости 1 (б)

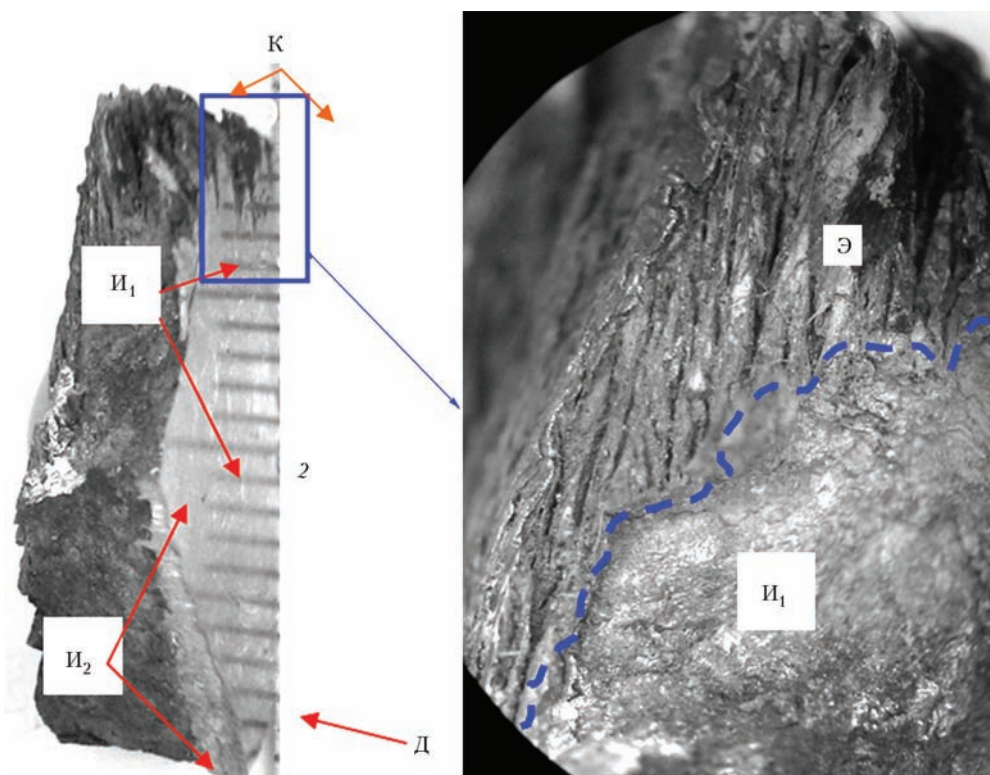


Рис. 16. Общий вид части темплета с раскрытой эксплуатационной трещиной: К – входная кромка, Э – эродированная поверхность в плоскости раскрытой трещины; И<sub>1</sub>, И<sub>2</sub> – поверхности эксплуатационного излома под Э до и после поворота трещины, соответственно; Д – зона долома; 2 – плоскость продольного сечения лопатки

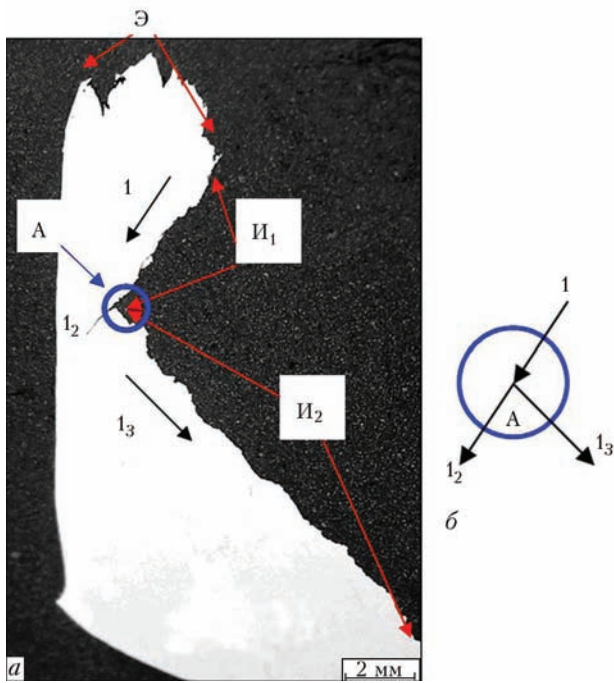


Рис. 17. Траектория (след) трещины в плоскости сечения 2 с лицевой стороны лопатки (на ответной части излома) (а) и схема раздвоения трещины в точке А (б)

волны, непосредственно под эродированной поверхностью, в плоскостях 1 и 2 (рис. 11) формировались множественные поперечные зародышевые микротрещины, ориентированные под углом 90 град. к направлению вытянутости колоний параллельных пластин  $\alpha$ -фазы с ГПУ решеткой и разделяющих их

тонких (шириной 0,1...0,4 мкм) прослоек  $\beta$ -фазы с ОЦК решеткой (рис. 11, 13–15).

**Фрактографические исследования поверхности трещины, обнаруженной в лопатке № 74.** Для проведения фрактографических исследований поверхности обнаруженной в лопатке № 74 эксплуатационной трещины ее раскрыли в жидком азоте, предварительно вырезав темплет, содержащий трещину, из пера лопатки.

Общий вид раскрытой эксплуатационной трещины (с разными зонами разрушения) и макрофрактограммой части излома показан на рис. 16, а траектория (след) трещины в плоскости 2 с лицевой стороны лопатки (на ответной части излома) на рис. 17.

На рис. 18 и 19 представлены характерные микрофрактограммы, полученные на электронном растровом микроскопе CAMSCAN-4 при исследовании поверхности разрушения лопатки № 74.

На рис. 20 представлены микрофрактограммы трещины под поверхностью эрозионного износа в зоне I<sub>1</sub> ближе к тыльной поверхности лопатки. Степень коррозионного растрескивания и коррозионных повреждений поверхности разрушения больше, чем в предыдущем случае, хотя признаков усталости не обнаружено.

Микрофрактограммы трещины в зоне I<sub>1</sub> у тыльной поверхности лопатки вблизи границы с зоной I<sub>2</sub> представлены на рис. 21. Хрупкое и

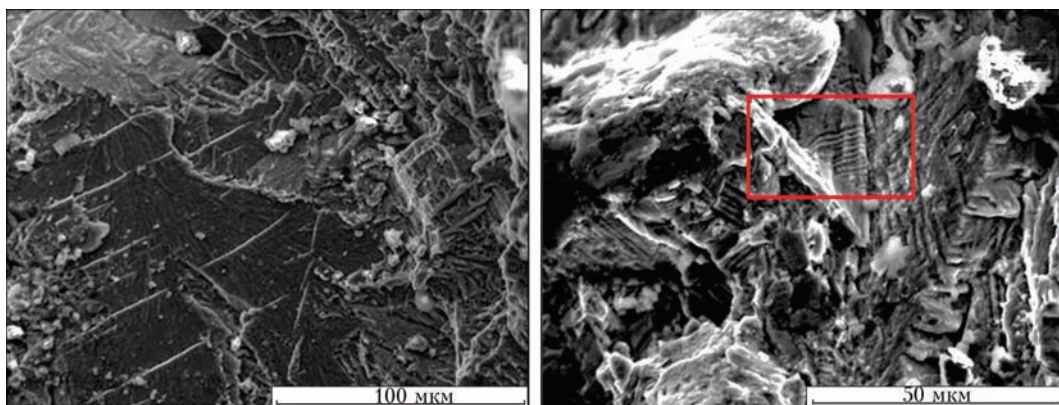


Рис. 18. Характерные микрофрактограммы с поверхности излома раскрытой трещины

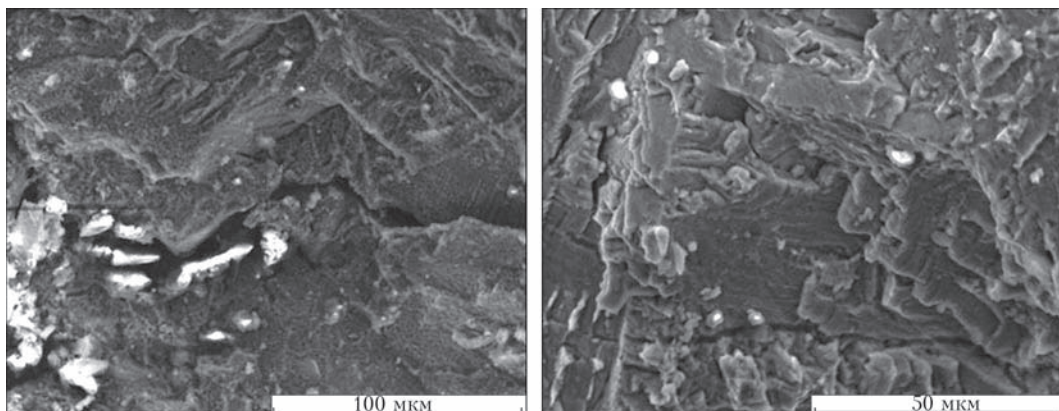


Рис. 19. Вторичные микротрещины при разрушении металла лопатки № 74 (сплав TC5)

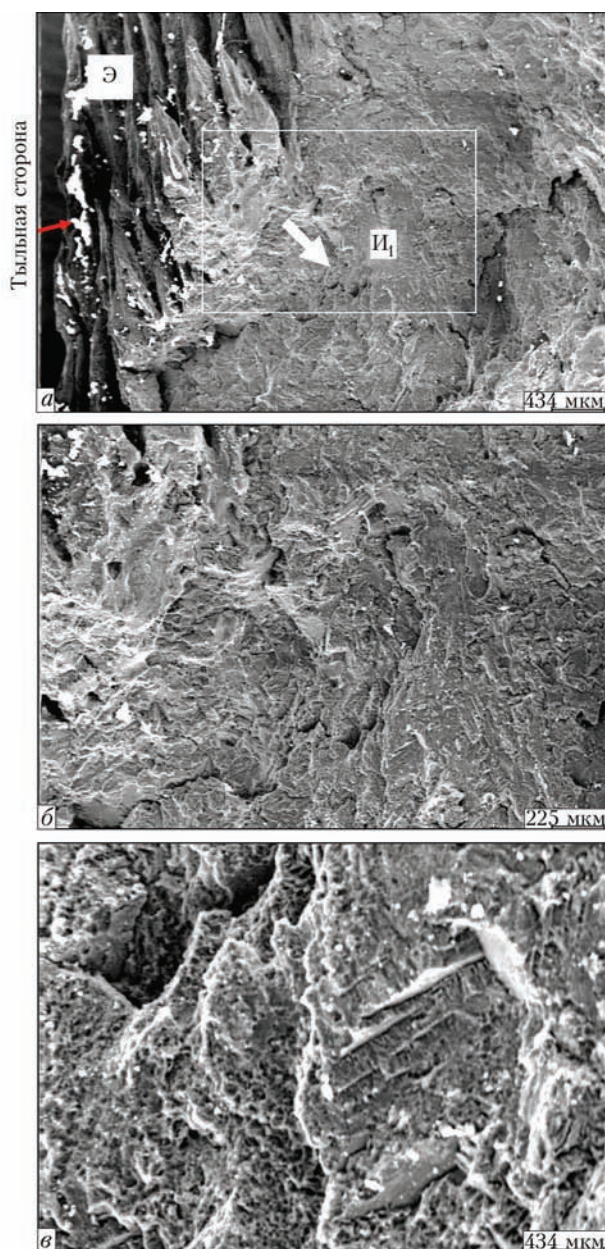


Рис. 20. Микрофрактограммы трещины под поверхностью эрозионного износа в зоне И<sub>1</sub> ближе к тыльной поверхности лопатки

квасихрупкое разрушение с образованием вторичных трещин без видимых следов коррозионных повреждений (рис. 21, а и б). Изредка встречаются участки с усталостными бороздками с шагом  $\delta$  меньше 1 мкм (рис. 21, в) При больших увеличениях видно, что поверхность разрушения сильно фрагментирована (рис. 21, б и в).

Микрофрактограммы трещины в средней части зоны И<sub>2</sub> представлены на рис. 24. Квасихрупкое разрушение без видимых следов коррозионных повреждений. Наряду с пластинчатым рельефом  $\alpha$ -фазы (рис. 22, б) периодически выявляется усталостный рельеф в виде террас с усталостными бороздками (шаг бороздок  $\delta$  в пределах 1...3 мкм) (рис. 22, в, г).

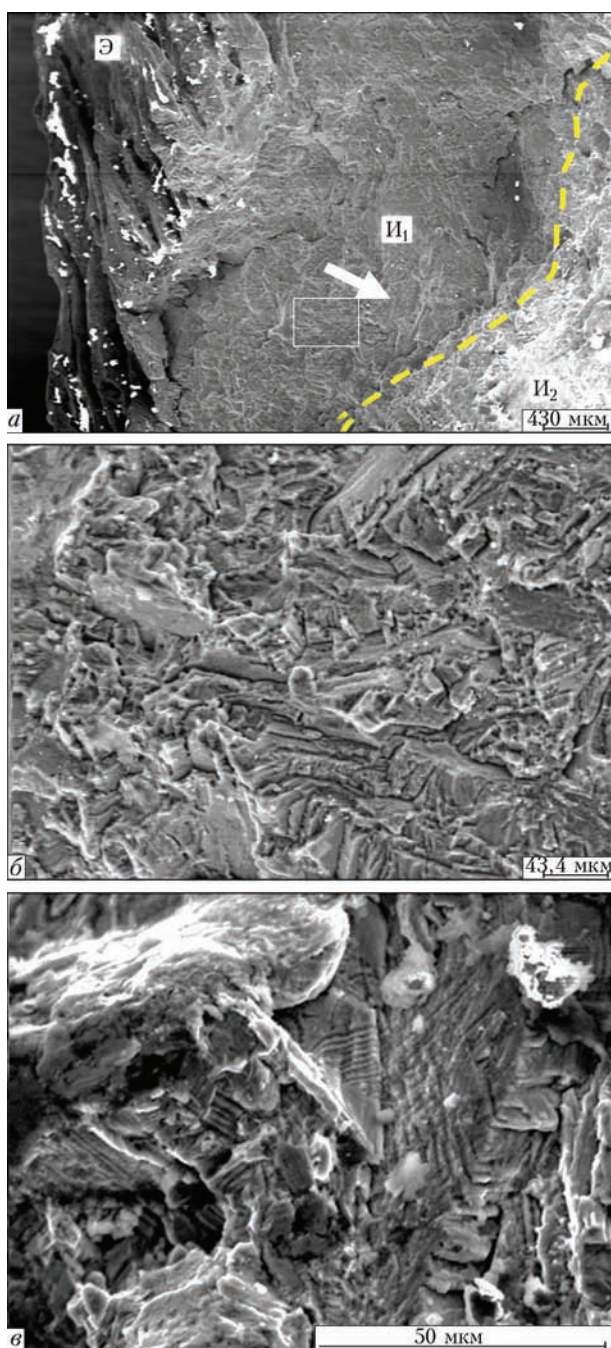


Рис. 21. Микрофрактограммы трещины в зоне И<sub>1</sub> у тыльной поверхности лопатки вблизи границы с зоной И<sub>2</sub>

В целом, разрушение лопатки № 74 носит сложный характер. Так, согласно рис. 20 и 21, при хрупком и квазихрупком механизмах разрушения в области излома под поверхностью эрозионного износа (в зоне И<sub>1</sub>) микрофрактограммы характеризуются коррозионным растрескиванием и следами точечных коррозионных повреждений, причем ближе к тыльной поверхности лопатки степень коррозионного растрескивания и коррозионных повреждений выше (рис. 21), чем в зоне И<sub>1</sub> ближе к лицевой поверхности (рис. 20). Признаков усталости под поверхностью эрозионного износа в зоне И<sub>1</sub> не обнаружено, однако с удалением от входной кромки границы с зоной И<sub>2</sub> изредка

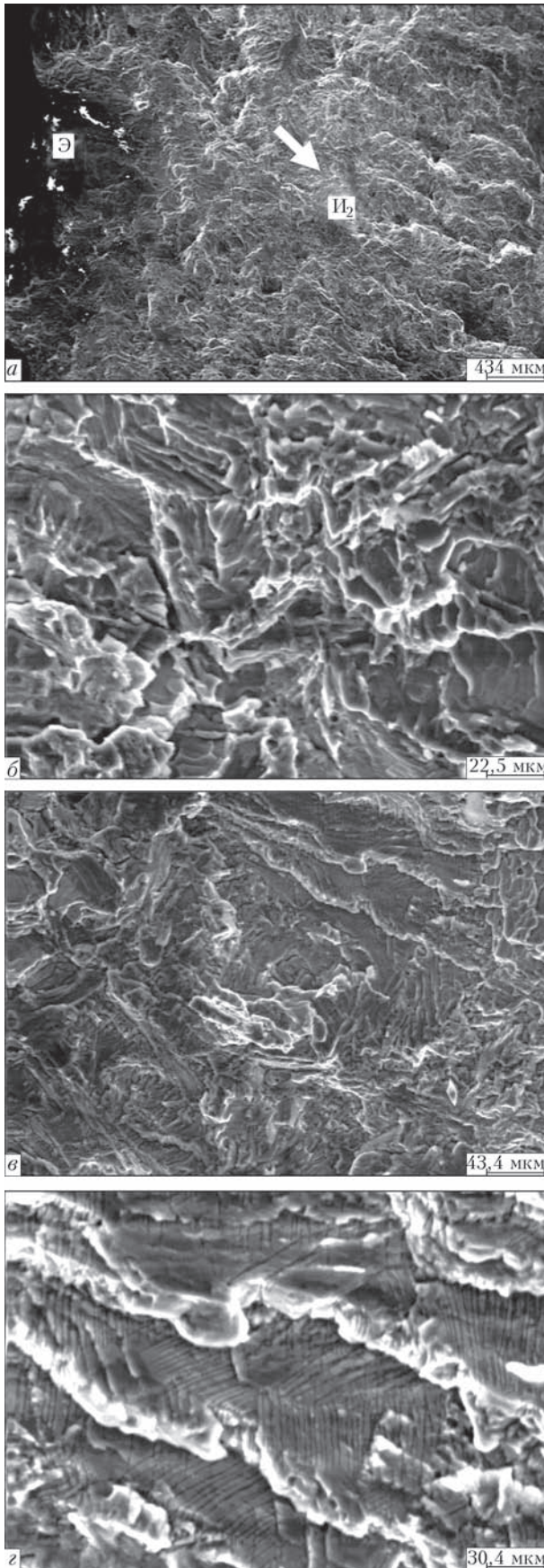


Рис. 22. Микрофрактограммы трещины в средней части зоны II<sub>2</sub> (описание а–г см. в тексте)

встречаются участки с усталостными бороздками с шагом  $\delta$  меньше 1 мкм (рис. 21, в), степень коррозионных повреждений снижается.

В средней части зоны II<sub>2</sub> (рис. 22) наблюдается квазихрупкое разрушение без видимых следов коррозионных повреждений. Наряду с пластинчатым рельефом  $\alpha$ -фазы (рис. 22, б) периодически выявляется усталостный рельеф в виде террас с усталостными бороздками (шаг бороздок  $\delta$  в пределах 1...3 мкм) (рис. 22, в, г).

При общем хрупком и квазихрупком механизме развития магистральной трещины и наличии вторичных микротрещин на многих участках поверхности разрушения наблюдается пластинчатый микрорельеф колоний  $\alpha$ -фазы, напоминающий усталостные бороздки. Наличие характерных бороздок усталости, обнаруженных на поверхности излома (рис. 21, в, 22, в и г), свидетельствует об усталостном механизме роста трещины, наряду с коррозионным растрескиванием.

**Особенности разрушения гладких образцов после усталостных испытаний.** Микрофрактограммы в разных зонах поверхности разрушения гладкого образца № 6 после усталостных испытаний при  $t = 20^\circ\text{C}$  ( $N = 60\,089\,482$  цикла) показаны на рис. 23. Поверхность разрушения носит волокнистый характер (рис. 23, д) с множеством гребней отрыва (рис. 23, а и б) и сильно фрагментирована. Участки с усталостными бороздками наблюдаются в средней части излома (рис. 23, в и г). Шаг бороздок  $\delta$  участка, изображенного на рис. 23, в колеблется в пределах 1...2 мкм, а на рис. 23, г – в пределах 3...5 мкм.

**Анализ работоспособности рабочих лопаток после длительной эксплуатации.** Поскольку, за период эксплуатации более 180 тыс. ч под действием вибрационных нагрузок на базе более  $10^{10}$  циклов во всех лопатках ЦНД пятой ступени была обнаружена только одна трещина (лопатка № 74), основной причиной образования которой по результатам проведенных исследований является не усталостный механизм, а эрозионный износ в сочетании, вероятнее всего, с внутренним дефектом при изготовлении, то максимальная величина размаха вибрационных напряжений в материале лопатки существенно ниже уровня предела выносливости для сплава TC5, который составляет приблизительно 300...400 МПа. Следовательно, образование макротрещин по усталостному механизму в лопатках ЦНД пятой ступени турбины К-1000-60/3000 при дальнейшей эксплуатации маловероятно. Принимая во внимание высокие механические характеристики материала TC5 лопатки, в том числе при циклическом нагружении, и отсутствие их деградации после длительной эксплуатации, возможно сделать предварительное заключение для лопаток данной конструкции с наработкой око-

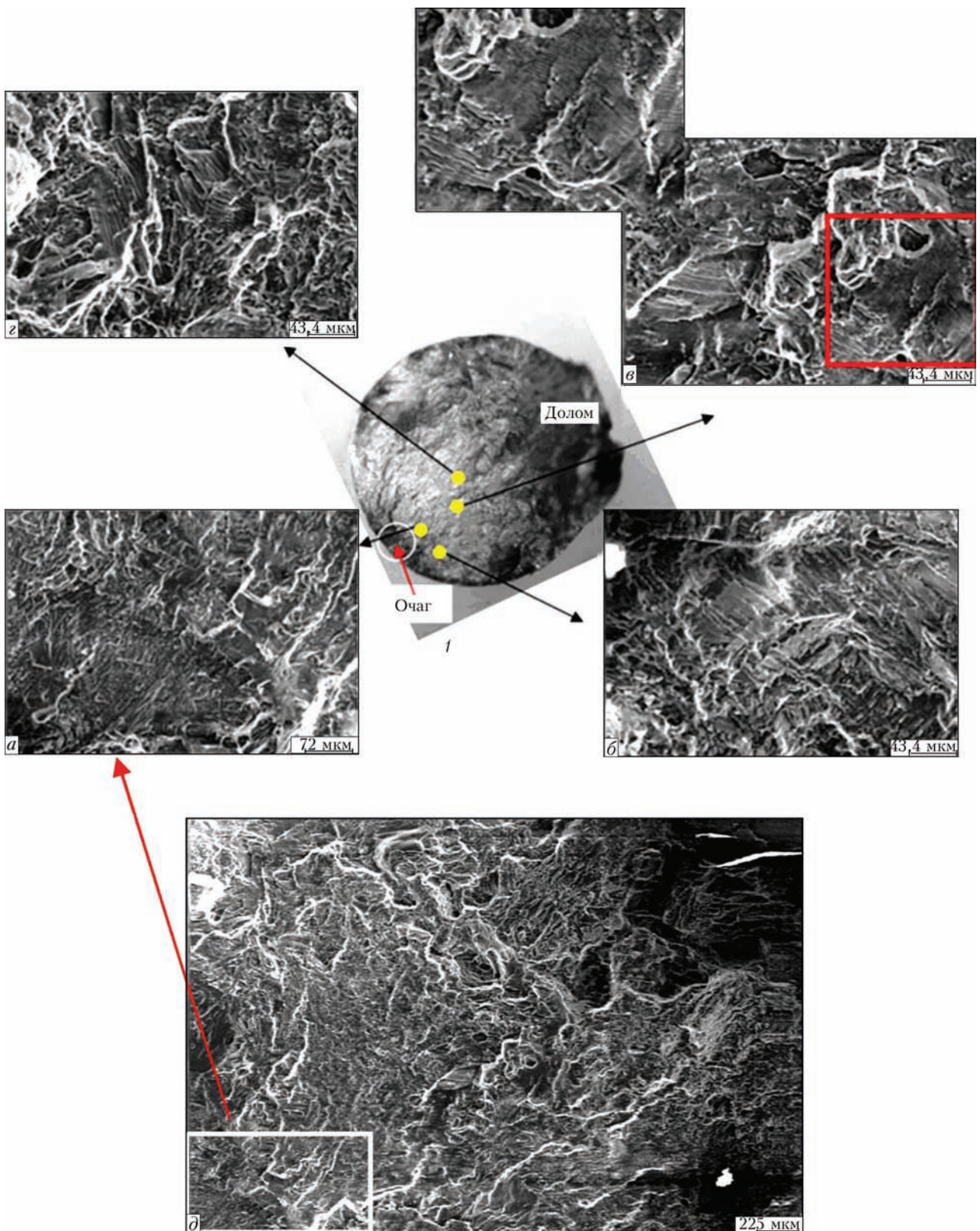


Рис. 23. Макро- и микрофрактограммы поверхности разрушения гладкого образца номер 6 после усталостных испытаний ( $N = 6\,089\,482$  цикла). Макроизлом (1); микрофрактограммы в разных зонах (описание см. в тексте)

ло 180 тыс. ч о достаточной работоспособности на период эксплуатации до 1 года до следующего ППР.

Однако для более точного прогнозирования ресурса эксплуатации рабочих лопаток 5-ой ступени ЦНД турбины К-1000-60/3000 с учетом эрозионного износа необходимо изучить напряженно-де-

формированное состояние лопатки под воздействием центробежных сил, каплеударной эрозии поверхности и усталостного нагружения при различных режимах эксплуатации, в том числе при прохождении резонансных частот в момент пуска турбины и повышенных оборотах до 3300 об/мин

и др., а также провести исследования зарождения макротрещин в местах концентрации напряжений, вызванных эрозионными повреждениями, и определить критические размеры трещин для потенциально опасных сечений лопаток.

### Выводы

1. Зарождение трещины в лопатке № 74 произошло в месте максимального эрозионного размыва вследствие длительной эксплуатации. При общем хрупком и квазихрупком механизме развития магистральной трещины и наличии вторичных микротрещин на многих участках поверхности разрушения наблюдается пластинчатый микрорельеф колоний  $\alpha$ -фазы, напоминающий усталостные бороздки. Наличие характерных бороздок усталости, обнаруженных на поверхности излома, свидетельствуют об усталостном механизме роста трещины наряду с коррозионным. Поворот магистральной трещины при ее распространении и механизме квазихрупкого растрескивания, видимо, вызван совместным воздействием изгибных (мода 1 – растяжение) и крутильных (мода 2 – сдвиг) колебаний.

2. В результате длительной эксплуатации произошли изменения химического состава сплава TC5 лопаток № 73 и № 74. Локальный химический анализ металла лопаток различных зон свидетельствует об уменьшении  $\alpha$ -стабилизатора (содержание Al ниже требований [6]). Особо следует отметить наличие повышенного содержания водорода на поверхности, прилегающей к «игло-видному» эрозионному повреждению и равному 0,0115 % при норме не более 0,01 %.

3. Структурные исследования металла лопаток непосредственно под эродированной поверхностью показали наличие следов периодической локализации пластической деформации и разрушения в отдельных ГПУ зернах. Характерным является тот факт, что если для участка лопатки № 74, который содержит трещину, наблюдаются микротрещины, то для лопатки № 73, как правило, такие микротрещины в устьях эродированных поверхностей обнаружены не были. Это, вероятно объясняется тем, что при длительной эксплуатации происходящие процессы распада (уменьшение количества) обедненной  $\beta$ -стабилизаторами ОЦК  $\beta$ -фазы, и соответственно, обогащение ванадием и усиление искажения ГПУ- решетки  $\alpha$ -фазы способствует торможению ударной волны, вызванной каплеударной эрозией поверхности лопатки, что в свою очередь приводит к локализации пластических деформаций и торможению микротрещин.

4. Механические свойства титанового сплава TC5 лопаток № 73 и № 74 соответствуют нормативным значениям, а деградации механических свойств за время эксплуатации не наблюдается.

Механические свойства определялись на стандартных образцах, вырезанных из неповрежденных каплеударной эрозией зон лопаток.

5. Поскольку, основной причиной образования трещины в рабочей лопатке 5-ой ступени ЦНД турбины К-1000-60/3000 по результатам проведенных исследований является не усталостный механизм, а эрозионный износ в сочетании, вероятнее всего, с внутренним дефектом при изготовлении, то учитывая высокие механические характеристики материала TC5 лопатки, в том числе при циклическом нагружении, и отсутствие их деградации после длительной эксплуатации, возможно сделать предварительное заключение для лопаток данной конструкции с наработкой около 180 тыс. часов о достаточной работоспособности на период эксплуатации до 1 года до следующего ППР с обязательной диагностикой их технического состояния. Для более точного прогнозирования ресурса эксплуатации рабочих лопаток с учетом эрозионного износа необходимо выполнить исследование напряженно-деформированное состояние лопатки при различных режимах эксплуатации.

### Список литературы

1. Костюк А. Г. (2007) *Динамика и прочность турбомашин*. Москва, Издательский дом МЭИ.
2. Дейч М. Е., Филипов Г. А. (1987) *Двухфазные течения в элементах теплоэнергетического оборудования*. Москва, Энергоатомиздат.
3. Ланина А. А. (2009) *Особенности структурных и фазовых превращений в титановых лопатках паровых турбин в процессе каплеударного воздействия*. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Санкт-Петербург.
4. Крылов Н. А., Скотникова М. А., Цветкова Г. В., Иванова Г. В. (2016) Влияние структуры и фазового состава материала лопаток паровых турбин из титанового сплава на их устойчивость к эрозионному разрушению. *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Естественные и инженерные науки*, 3(249), сс. 86–92.
5. Білоус В. А., Воеводін В. М., Хороших В. М. та ін. (2016) Створення експериментального обладнання і основних технологічних прийомів отримання кавітаційно-стійких захисних покриттів на робочих поверхнях лопаток парових турбін з титанового сплаву VT6 з метою заміщення імпорту аналогічної продукції. *Наука та інновації*, 12, 4, 29–39.
6. Канель Г. И., Разоренов С. В., Уткин А. В., Фортов В. Е. (1996) *Ударно-волновые явления в конденсированных средах*. Москва, Янус-К.
7. ТУ 1-5-130-78 (1978) *Прутки катаные и кованные из титанового сплава. Марка TC5*.
8. ГОСТ 1497-84 (1984) *Металлы. Методы испытаний на растяжение*.
9. ГОСТ 25502-79 (1981) *Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость*.

### References

1. Kostyuk, A.G. (2007) *Dynamics and strength of turbomachines*. Moscow, Izd. Dom MEI [in Russian].
2. Dejch, M.E., Filipov, G.A. (1987) *Two-phase flows in components of thermal power generation equipment*. Moscow, Energoatomizdat [in Russian].
3. Lanina, A.A. (2009) *Features of structural and phase transformations in titanium blades of steam turbines during drop-impact effect*. In: Syn. of Thesis for Cand. of Techn. Sci. Degree. St.-Petersburg [in Russian].

4. Krylov, N.A., Skotnikova, M.A., Tsvetkova, G.V., Ivanova, G.V. (2016) Influence of the structure and phase composition of the material of steam turbine blades from a titanium alloy on their resistance to erosion fracture. *Nauchno-Tekhnicheskie Vedomosti St.-PPU. Estestvennye i Inzhenernye Nauki*, 3(249), 86-92 [in Russian].
5. Bilous, V.A., Voevodin, V.M., Khoroshikh, V.M. et al. (2016) Development of experimental equipment and basic techniques for producing cavitation-resistant protective coatings on working surfaces of steam turbine blades from titanium alloy VT-6 with a purpose of substitution of import of similar products. *Nauka ta Innovatsii*, 12(4), 29-39 [in Ukrainian].
6. Kanel, G.I., Razorenov, S.V., Utkin, A.V., Fortov, V.E. (1996) *Shock-wave phenomena in condensed media*. Moscow, Yanus-K [in Russian].
7. TU 1-5-130-78 (1978): *Rods rolled and forged from titanium alloy*. Grade TS5 [in Russian].
8. GOST 1497-84 (1984): *Metals. Tensile testing methods* [in Russian].
9. GOST 25502-79 (1981): *Strength analysis and testing in mechanical engineering. Methods of mechanical testing of metals. Methods of fatigue testing* [in Russian].

В. М. ТОРОП<sup>1</sup>, О. В. МАХНЕНКО<sup>1</sup>, Г. Ю. САПРИКІНА<sup>1</sup>,  
Е. Е. ГОПКАЛО<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ІЕЗ ім. С. О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua  
<sup>2</sup>Ін-т проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України. 01014, м. Київ, вул. Тимірязевська, 2. E-mail: info@ipp.kiev.ua

#### РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРИЧИН УТВОРЕННЯ ТРІЩИН В ЛОПАТКАХ З ТИТАНОВОГО СПЛАВУ ПАРОВИХ ТУРБІН ТИПУ К-1000-60/3000

У статті представлені результати досліджень причин утворення тріщин в лопатках останнього ступеня парових турбін К-1000-60/3000, що експлуатуються на АЕС України. Основні причини, фізична сутність формування і накопичення ерозійної пошкоджуваності поверхні матеріалів лопаток в результаті високошвидкісного краплеударного впливу переохолодженої пари до теперішнього часу залишаються недостатньо вивченими. При виконанні роботи було проведено комплекс досліджень структури, хімічного складу і механічних властивостей

матеріалу лопатки. Виконано морфологічні і фрактографічні дослідження поверхні тріщини. За результатами цих досліджень сформульовані висновки про причини виникнення дефектів і про можливість прогнозування залишкового ресурсу лопаток. Бібліогр. 9, табл. 3, рис. 23.

Ключові слова: ерозійна пошкодженість, тріщини, лопатка парової турбіни, морфологічні та фрактографічні дослідження, хімічний склад, механічні властивості, титановий сплав ТС5

V.M. TOROP<sup>1</sup>, O.V. MAKHNENKO<sup>1</sup>, G.Yu. SAPRYKINA<sup>1</sup>,  
E.E. GOPKALO<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> G.S.Pisarenko Institute for Problems of Strength of the NAS of Ukraine, 2 Timiryazevskaya str., 01014, Kyiv, Ukraine. E-mail: info@ipp.kiev.ua

#### RESULTS OF STUDYING THE CAUSES FOR CRACKING IN TITANIUM ALLOY BLADES OF STEAM TURBINES OF K-1000-60/3000 TYPE

The paper presents the results of studying the causes for cracking in blades of the last stage of steam turbines K-1000-60/3000, operating in Ukrainian NPP. The main causes, physical essence of formation and accumulation of erosion damage of blade material surface as a result of high-velocity drop impact of overcooled steam still remain insufficiently studied. During performance of the work, a comprehensive study of the structure, chemical composition and mechanical properties of blade material was conducted. Morphological and fractographic investigations of the crack surface were performed. Proceeding from the results of these studies, conclusions were formulated on the causes of defects and the possibility of prediction of the residual life of blades. 9 References, 3 Tables, 23 Figures.

Keywords: erosion damage, cracks, steam turbine blade, morphological and fractographic studies, chemical composition, mechanical properties, titanium alloy TS5

Поступила в редакцію  
20.02.2018



### 1st INTERNATIONAL CONFERENCE ON WELDING & NON DESTRUCTIVE TESTING 2018 1st ICWNDT-2018

October 22-23, 2018, Athens – Greece

#### Conference Topics:

Advanced NDT and Ultrasonic Techniques  
Advanced joining processes  
Aerospace and Marine.  
Applications and innovations of NDT methods.  
Applications for the power generation (including nuclear technologies).  
Applications for the shipping and aerospace industries.  
Composite materials, Welding and Adhesion  
Developments in automation of welding processes  
Developments in dissimilar materials joining  
Developments in pipeline construction  
Developments in welding consumables  
Developments in welding power sources technology  
Digital Radiography.  
Fundamental and applications of welding and joining process.  
Industrial Manufacturing.

Inspection, Training and Certification of Welding and NDT personnel.  
Microstructure and metallurgical behaviors in welds  
Modeling and Simulation of Welds and Welded Structures.  
NDT applications in the civil structures industry.  
NDT for the diagnostics and refurbishment of cultural heritage monuments  
NDT in Medical Applications.  
NDT Technology Transfer.  
Non-Contact NDT methods.  
Residual stress and distortion in weldments.  
Testing and inspections for weld integrity.  
Theoretical modeling.  
Weld properties and performance.  
Weldability of materials.  
Welding consumables and equipments.  
Welding practices in industries.

# ОПЕРАТИВНЫЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА И НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ СВАРНЫХ ПАНЕЛЕЙ ИЗ СПЛАВА VT-20 МЕТОДАМИ ЦИФРОВОЙ ШИРОГРАФИИ И СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Л. М. ЛОБАНОВ, В. А. ПИВТОРАК

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

Разработаны технологии неразрушающего контроля качества и определения остаточных напряжений сварных конструкций на основе методов цифровой ширографии и спекл-интерферометрии. Представлены результаты диагностирования качества сварных титановых панелей из сплава VT-20, изготовленных с предварительным упругим растяжением, и определения остаточных напряжений в элементах сварных панелей. Показана эффективность использования методов цифровой ширографии и спекл-интерферометрии для диагностики качества и определения остаточных напряжений в элементах титановых панелей без демонтажа оснастки для растяжения, что позволяет при необходимости сразу приступить к устранению дефектов. Библиогр. 10, рис. 11.

*Ключевые слова:* неразрушающий контроль качества, определение напряженного состояния, диагностика тонкостенных панелей, цифровая ширография, электронная спекл-интерферометрия

В современных отраслях промышленности (машино- и авиастроении, космической технике и др.) широкое применение находят высокопрочные металлы и сплавы. Повышение качества, надежности и работоспособности конструкций, изготовленных из таких материалов, неразрывно связано с созданием и развитием оперативных методов и средств неразрушающего контроля качества и определения напряженного состояния. Обычно эти конструкции работают в условиях сложного механического воздействия и температурных градиентов. Концентрация напряжений, возникающих в зоне дефектов сварных швов, понижает надежность и долговечность конструкций.

В настоящее время для выявления дефектов в материалах и конструкциях разработан ряд методов неразрушающего контроля таких, как рентгеновский, радиографический, ультразвуковой, механический и др. Следует отметить, что ни один из этих методов неразрушающего контроля не является универсальным. Каждый имеет преимущества и недостатки, свою область применения, которая определяется чувствительностью и точностью обнаружения дефектов.

Между тем инженерная практика ставит все новые задачи, направленные на повышение работоспособности и надежности конструкций. Для их решения необходимы новые методы неразрушающего контроля, позволяющие получать оперативную и более точную информацию об объекте контроля. К ним относятся методы лазерной интерферометрии – цифровая голография, электронная спекл-интерферометрия и ширография.

Цифровая ширография (ЦШ) является наиболее интенсивно развивающимся когерентным оптическим методом исследования конструкций, который осуществляется с помощью простых оптических устройств и позволяет бесконтактно исследовать поверхность объекта, не повреждая ее. Этот метод используется при исследовании различных материалов, конструкций и позволяет измерять деформацию объекта в условиях его нагружения. Этим обусловлена нечувствительность ЦШ к жестким смещениям объекта, вызванным влиянием окружающей среды, что определяет ее универсальность и эффективность применения в производстве [1–3]. Важным преимуществом ЦШ для неразрушающего контроля (НК) качества объектов является то, что в отличие от традиционных методов, которые только фиксируют наличие и отсутствие дефектов, она позволяет выявлять концентрацию напряжений, вызванную присутствием дефекта и конструктивными особенностями объекта.

При практическом применении цифровой ширографии для НК качества необходимо учитывать следующие допущения, которые вытекают из оптической схемы ширографического интерферометра:

- размеры исследуемых объектов или их участков должны быть существенно меньше, чем расстояние от источника лазерного света до поверхности контролируемого объекта;
- широмодуль располагается перпендикулярно к контролируемому участку поверхности объекта;
- направление освещения поверхности исследуемого объекта лазерным светом выбирается



по возможности ближе к нормали исследуемого участка поверхности объекта.

Технологию НК качества с использованием метода цифровой широкографии применяли для диагностики элементов и узлов конструкций, изготовленных из различных конструкционных материалов [4–8].

В настоящее время в авиационной и аэрокосмической промышленности все более широкое применение находят сварные тонкостенные панели с продольными ребрами жесткости, изготовленные из титановых сплавов. Контроль качества таких панелей достаточно трудоемкий и вызывает ряд сложностей. В связи с этим актуальным является разработка новых методов исследования их качества.

Метод ЦШ применяли для НК качества стрингерных панелей, выполненных из высокопрочного титанового сплава ВТ-20 размером  $1200 \times 550 \times 2,5$  мм (рис. 1). Четыре продольных ребра жесткости высотой 25 мм и толщиной 2,5 мм приваривали прорезными швами к титановому листу. Расстояние между ребрами составляло 100 мм. Сварку титановых панелей выполняли в условиях их предварительного упругого растяжения. При этом использовали аргонодуговую сварку неплавящимся электродом по слою активирующего флюса. После сварки титановая панель оставалась в оснатке в растянутом состоянии.

НК качества выполняли в следующей последовательности. Контролируемый участок сварного шва растянутой панели освещали лазерным светом и отраженная волна, характеризующая исходное состояние исследуемой поверхности, записывалась в память компьютера. После этого контролируемый участок обдували теплым воздухом температурой около  $50 \dots 70$  °С на протяжении  $25 \dots 40$  с, что вызывало его деформирование. Затем световую волну, отраженную от деформированного участка исследуемой поверхности, также записывали в память компьютера. С помощью специальной компьютерной программы записанную оптическую информацию обрабатывали до

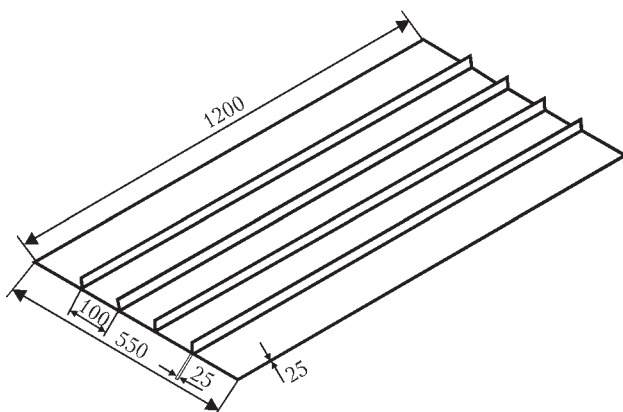


Рис. 1. Схема сварной панели, выполненной из титанового сплава ВТ-20

получения широкограммы, трехмерной картины деформирования исследуемой поверхности и кривых распределения производной  $\partial w/\partial x$  или  $\partial w/\partial y$  вдоль выбранных сечений.

Результат контроля сварной панели № 1 из сплава ВТ-20, выполненной автоматической аргонодуговой сваркой погруженной дугой, представлен на рис. 2 а. На широкограмме исследуемого участка сварного шва (рис. 2, б) на общем фоне деформирования видно локальное изменение картины интерференционных полос, что свидетельствует о наличии внутренних дефектов. Построенная трехмерная картина деформирования (рис. 2, в) и кривые распределения производной  $\partial w/\partial x$  вдоль выбранных сечений дефектного А-А и бездефектного Б-Б (рис. 2, г) подтверждают наличие дефектов на исследуемом участке (показаны стрелкой).

Проведенный рентгеновский контроль качества рассматриваемого участка сварного шва титановой панели из сплава ВТ-20 показал наличие скопления пор размером  $0,2 \dots 0,4$  мм.

При исследовании сварной титановой панели № 2 обнаружен участок прерывания дуги, на котором возникает концентрация деформаций в месте остановки сварки (рис. 3, б). Ширографический контроль качества выполняли с использованием параметров нагрева, аналогичных описанным выше.

Результаты дальнейшей обработки интерференционных полос до получения трехмерной картины деформирования (рис. 3, в) и построения кривых распределения производных  $\partial w/\partial x$  вдоль исследуемых сечений А-А и Б-Б, соответственно, дефектного и бездефектного участков шва (рис. 3, г), подтвердили наличие локального скачка производной  $\partial w/\partial x$  на участке прерывания дуги при сварке панели.

На рис. 4, б–г показаны, соответственно, картина интерференционных полос, трехмерная картина деформирования контролируемого участка шва сварной титановой панели № 3, выполненной автоматической аргонодуговой сваркой погруженной дугой, и распределение производных  $\partial w/\partial x$  вдоль исследуемых сечений А-А и Б-Б на участке сварного шва после его ремонта с применением ручной дуговой сварки. Наглядно видно, что после ремонта дефектного участка шва наблюдается резкое локальное изменение производной  $\partial w/\partial x$ , что характеризует концентрацию деформаций в восстановленном с помощью ремонта участке шва.

Проведенная серия экспериментов по бесконтактному НК качества сварных титановых панелей с ребрами жесткости, изготовленных из сплава ВТ-20 и выполненных в условиях их предварительного упругого растяжения, показала, что метод цифровой широкографии позволяет оперативно исследовать качество сварных панелей и опре-

делять дефектные участки сварных швов. Особенно важным является то, что метод позволяет без демонтажа оснастки для растяжения титановой панели выявлять дефектные зоны и в случае необходимости сразу приступить к их устранению.

При сварке титановых панелей следует также учитывать, что прерывание сварочной дуги при выполнении шва и ручная ремонтная сварка участков шва вызывают локальную концентрацию деформаций, которая при воздействии эксплуатационных нагрузений может привести к снижению ресурса работы панелей.

Весомыми факторами, снижающими работоспособность и ресурс эксплуатации титановых панелей, являются остаточные сварочные напряжения и деформации. В связи с этим важным является создание и совершенствование методов и средств снижения напряжений и деформаций. Для тонкостенных панелей, содержащих длинные прямолинейные сварные швы, наиболее эф-

фективным методом снижения остаточного напряженно-деформированного состояния является их упругое предварительное деформирование.

Суть метода предварительного упругого деформирования заключается в том, что в свариваемых элементах создаются растягивающие напряжения, которые в процессе сварки взаимодействуют со сварочными напряжениями, значительно снижая их остаточную величину.

Метод получил развитие и используется в институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины при сварке различных высокоточных листовых конструкций из стали, а также сплавов титана и алюминия [9]. При использовании оптимальных параметров предварительного упругого растяжения исследуемых конструкций достигаются минимальные значения остаточных напряжений и деформаций коробления. Метод реализуется с помощью специализированной сборочно-сварочной оснастки и не оказывает како-

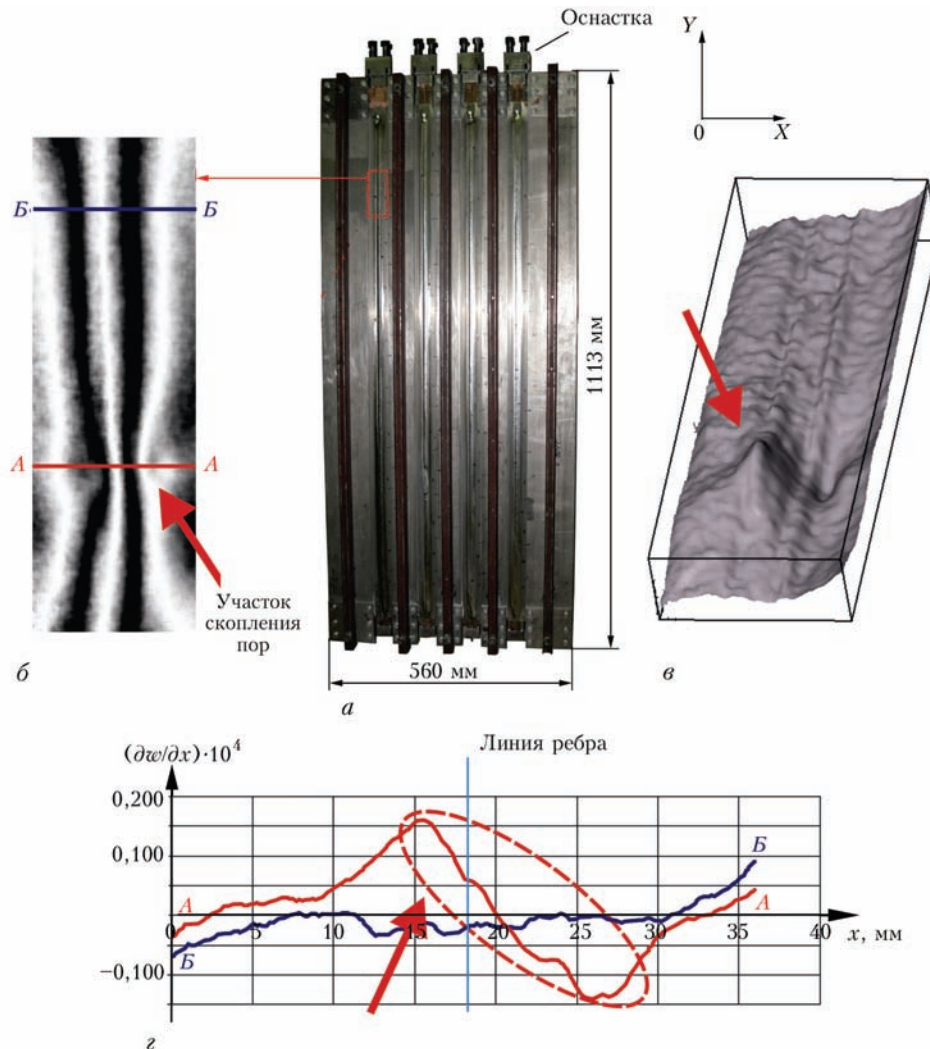


Рис. 2. Неразрушающий контроль качества сварной титановой панели № 1 с ребрами жесткости, изготовленной в условиях предварительного упругого растяжения: а – панель в силовой механической оснастке после сварки; б – широкоугольная фотография с нанесенными исследуемыми сечениями контролируемого участка шва панели, который нагружался обдувом тепловым воздухом ( $T = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ ); в – 3-D изображение распределения производной  $dw/dx$  на исследуемом участке; г – распределение производной  $dw/dx$  вдоль сечений А-А и Б-Б, которые проходят по дефектному и бездефектному участку, соответственно

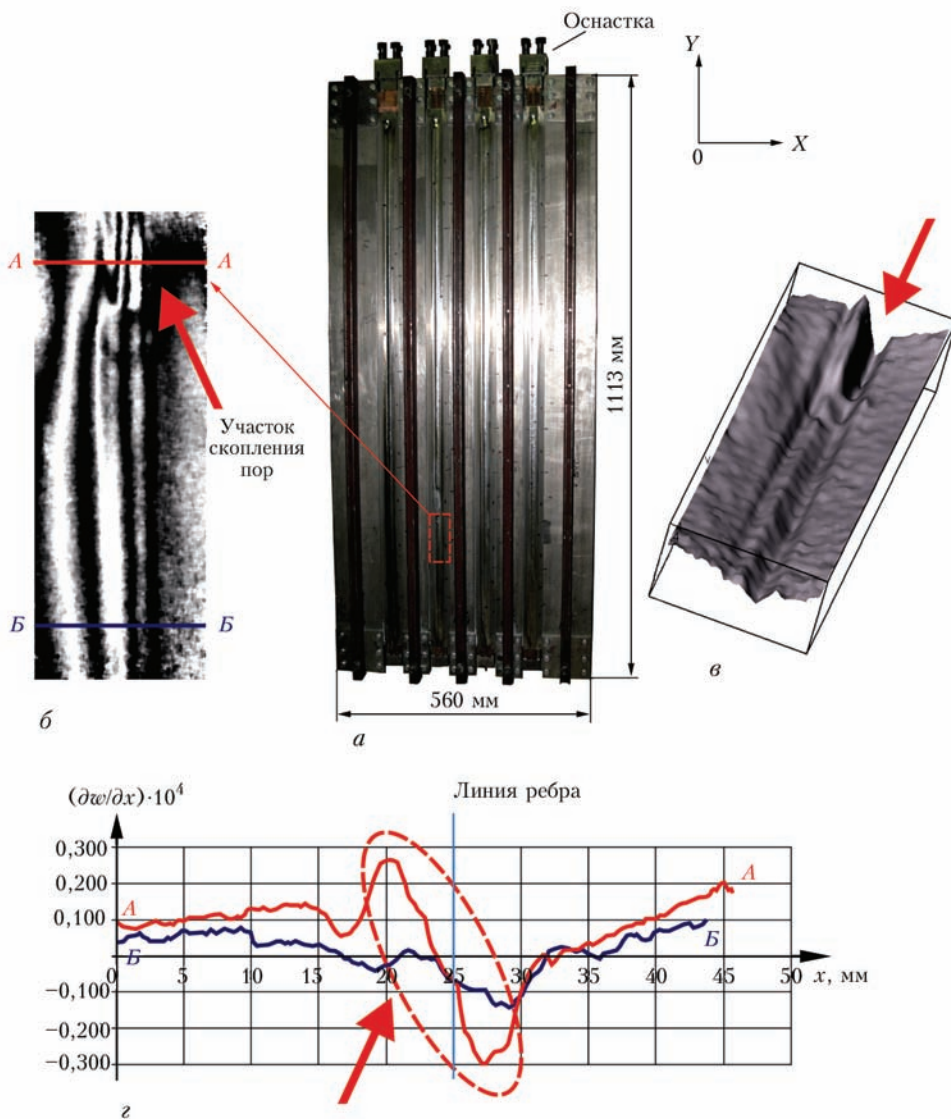


Рис. 3. Неразрушающий контроль качества сварной титановой панели № 2 с ребрами жесткости, изготовленной в условиях предварительного упругого растяжения (описание а–г – то же, что и на рис. 2)

го-либо отрицательного воздействия на свойства сварного соединения.

Для исследования влияния предварительного упругого растяжения свариваемых элементов на остаточные напряжения были проведены эксперименты при сварке тавровых образцов длиной 480 мм и шириной 100 мм с одним ребром жесткости высотой 25 мм (рис. 5), толщина листа и ребра – 2,5 мм. Остаточные напряжения в тавровых образцах определялись методом электронной спекл-интерферометрии в сочетании с методом отверстий.

Компактный спекл-интерферометрический прибор для определения остаточных напряжений, разработанный в ИЭС им. Е. О. Патона, приведен на рис. 6.

После измерения методом спекл-интерферометрии перемещений, возникающих в области упругой разгрузки напряжений с помощью высверленного отверстия, вычисляются остаточные

напряжения с использованием зависимостей, полученных в результате моделирования напряженно – деформированного состояния методом конечных элементов.

Определение [10] остаточных напряжений методом спекл-интерферометрии выполняется в следующей последовательности: спекл-интерферометрический прибор устанавливается на исследуемый сварной элемент – на участок, в котором необходимо определить остаточные напряжения. Контролируемая зона освещается лазерным светом и отраженная световая волна, характеризующая исходное состояние контролируемого участка, с помощью CCD – камеры вводится в память компьютера. После упругой разгрузки напряжений, вызванной сверлением несквозного отверстия с заданным диаметром и глубиной, отраженная световая волна аналогично исходной также вводится в память компьютера. После компьютерной обработки двух световых волн, полученных

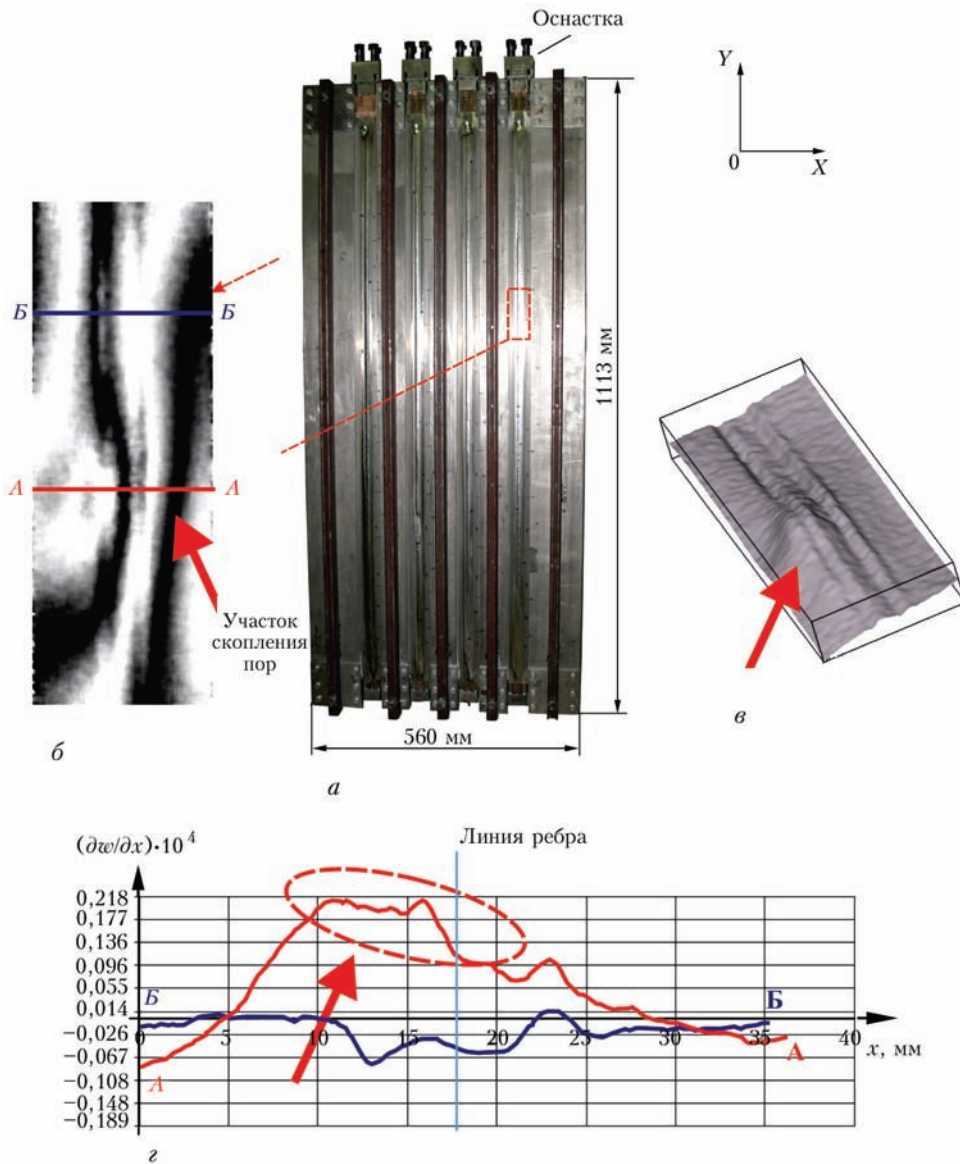


Рис. 4. Неразрушающий контроль качества сварной титановой панели № 3 с ребрами жесткости, изготовленной в условиях предварительного упругого растяжения: описание а-г – то же, что и на рис. 2

до и после локальной упругой разгрузки остаточных напряжений с помощью сверления небольшого несквозного отверстия, на мониторе наблюдается интерференционная картина полос в области отверстия, которая содержит информацию о величине остаточных напряжений в контролируемой точке исследуемого участка объекта (рис. 7).

Исследования выполнялись по следующей схеме. Вначале сваривались тавровые образцы на одних и тех же режимах и с применением одной и той же сборочно-сварочной оснастки без предварительного упругого растяжения. На рис. 8 приведены кривые распределения продольных остаточных напряжений  $\sigma_x$  и поперечных  $\sigma_y$  в сварных тавровых соединениях, изготовленных из титанового сплава ВТ-20 без применения предварительного упругого растяжения свариваемых элементов. Видно, что в исследуемом сечении А-А, которое проходит через середину таврового образ-

ца перпендикулярно оси шва, в центре сварного шва формируются остаточные напряжения  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  величиной примерно 400 и 100 МПа, соответственно. При этом максимального значения (около 550 МПа) остаточные продольные напряжения  $\sigma_x$  достигают на расстоянии примерно 6 мм от оси шва (ширина шва около 10 мм).

При сварке тавровых образцов с предварительным растяжением величиной  $0,22\sigma_{0,2}$

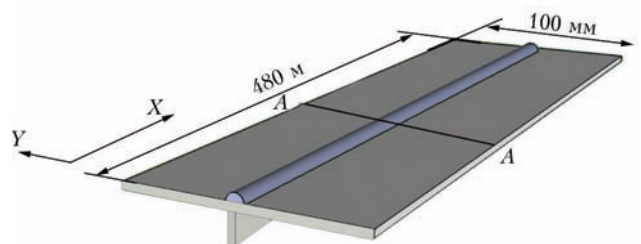


Рис. 5. Схема сварного таврового соединения из титанового сплава ВТ-20

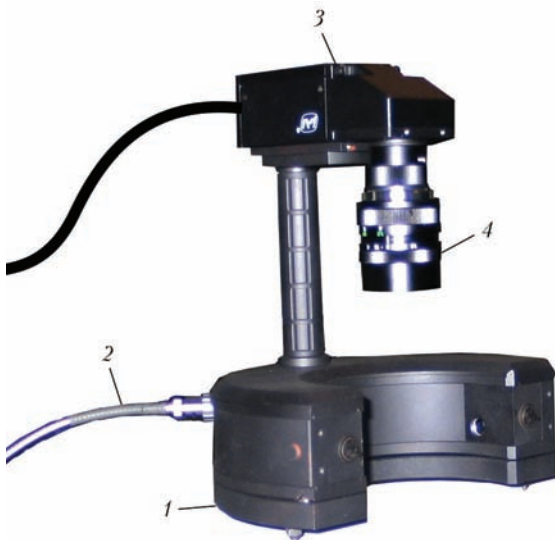


Рис. 6. Компактный спекл-интерферометрический прибор: 1 – спекл-интерферометр; 2 – световод; 3 – CCD – камера; 4 – объектив

( $\sigma_{0,2} = 950$  МПа – предел текучести сплава ВТ-20) (рис.9) остаточные продольные напряжения  $\sigma_x$  в поперечном сечении в центре шва снижаются до величины примерно 150 МПа, что в 2,6 раза меньше, чем в сварном тавровом соединении, выполненном без предварительного упругого растяжения (рис. 8). Напряжения  $\sigma_y$  достигают величины около 60 МПа (рис. 9).

Максимальные продольные остаточные напряжения  $\sigma_x$  величиной примерно 260 МПа достигаются на расстоянии около 6 мм от оси шва, что в 2,1 раза меньше, чем в сварном соединении, выполненном без предварительного упругого растяжения.

После сварки тавровых образцов с предварительным упругим растяжением величиной  $0,36 \sigma_{0,2}$  (рис. 10) остаточные напряжения в поперечном сечении в центре шва уменьшаются до величины примерно 98 МПа, что в 4 раза меньше в сравнении с тавровым соединением, выполненным без предварительного упругого растяжения. Остаточные напряжения в этом случае достигают на расстоянии, близком к 6 мм, максимального значения примерно 145 МПа, что в 3,8 раза ниже, чем в образце, выполненном без предварительного упругого растяжения.

Сварка тавровых образцов с предварительным упругим растяжением величиной  $0,46 \sigma_{0,2}$  (рис. 11)

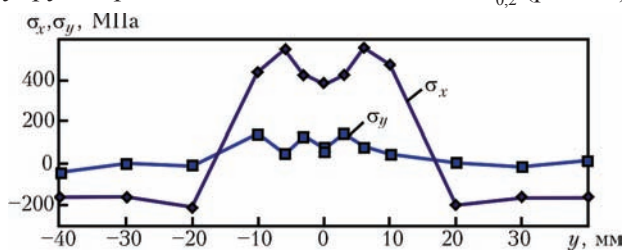


Рис. 8. Распределение напряжений  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  в поперечном сечении листа (полки) сварного таврового соединения (сварка без предварительного упругого растяжения  $\sigma_{\text{упр}} = 0$ )

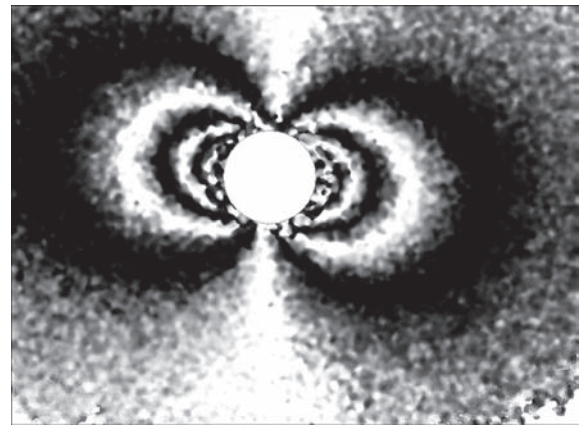


Рис. 7. Типичная интерференционная картина полос вокруг высверленного несквозного отверстия после упругой релаксации остаточных напряжений

приводит в центре шва практически к нулевым продольным и поперечным остаточным напряжениям  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  (примерно 25 МПа) в центральном сечении А-А, которое проходит перпендикулярно сварному шву.

Выполненные эксперименты с использованием сварных тавровых соединений позволяют оценить влияние величин предварительного упругого деформирования свариваемых элементов на уровень остаточных напряжений, вызванных процессом сварки. Анализ полученных результатов показал, что использование предварительного упругого растяжения свариваемых элементов на величину  $0,22 \sigma_{0,2}$  позволяет снизить продольные и поперечные остаточные напряжения  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  более, чем в 2 раза. Дальнейшее увеличение величины предварительного упругого растяжения свариваемых элементов существенно снижает продольные и поперечные остаточные напряжения  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  и при величине растяжения около  $0,46 \sigma_{0,2}$  остаточные продольные и поперечные напряжения близки к нулевым.

При этом следует учитывать, что при таких уровнях предварительного упругого растяжения свариваемых элементов сборочно-сварочная оснастка должна иметь достаточно большую жесткость и обеспечивать возможность создания значительных усилий при растяжении свариваемых элементов.

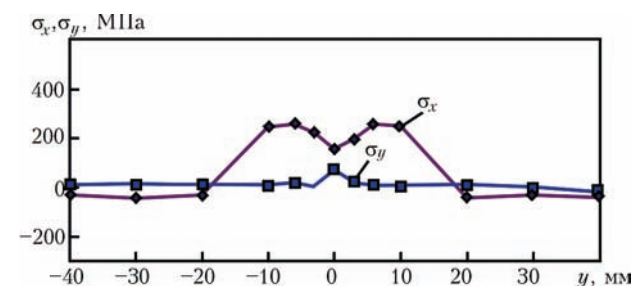


Рис. 9. Распределение напряжений  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  в поперечном сечении листа (полки) сварного таврового соединения, выполненного в условиях предварительного упругого растяжения ( $\sigma_{\text{упр}} = 0,22 \sigma_{0,2}$ )

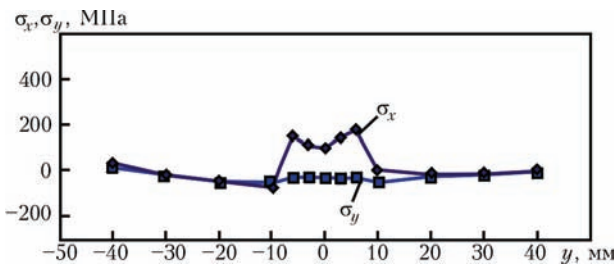


Рис. 10. Распределение напряжений  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  в поперечном сечении листа (полки) сварного таврового соединения, выполненного в условиях предварительного упругого растяжения ( $\sigma_{\text{нуп}} = 0,36 \sigma_{0,2}$ )

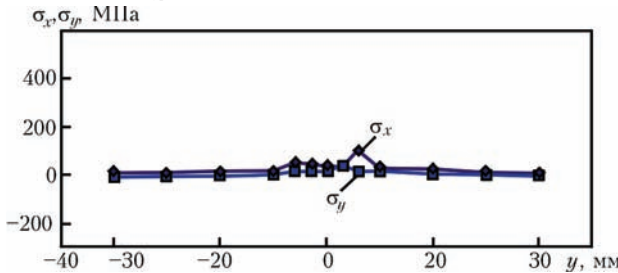


Рис. 11. Распределение напряжений  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  в поперечном сечении листа (полки) сварного таврового соединения, выполненного в условиях предварительного упругого растяжения ( $\sigma_{\text{нуп}} = 0,46 \sigma_{0,2}$ )

Таким образом, оценка результатов исследования влияния на остаточные напряжения предварительного упругого растяжения свариваемых элементов тавровых соединений, выполненных из высокопрочного титанового сплава ВТ-20, показала высокую эффективность применения предварительного упругого растяжения для снижения остаточных сварочных напряжений в тавровых соединениях.

Применение электронной спекл-интерферометрии в сочетании с методом отверстий, позволило оперативно и с высокой точностью определить остаточные напряжения в сварных тавровых соединениях из титана толщиной 2,5 мм и оптимизировать технологию их сварки в условиях предварительного растяжения.

**Список литературы**

1. Hung Y. Y., Ho H. P. (2005) Shearography: An optical measurement technique and applications. *Materials Science and Engineering*, **49**, 61–87.
2. Collrep J., Krupka R., Siebert T. (2007) Industrial applications of shearography for inspection of aircraft components. *NDT World Review*, **36**, 6, 28–31.
3. Лобанов Л. М., Пивторак В. А., Савицкая Е. М., Киянец И. В. (2008) Диагностика элементов и узлов конструкций с применением метода электронной ширографии. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **4**, 7–13.
4. Feng H. J., Zhang J., Liu X. K. (2012) Studies on digital shearography for testing of aircraft composite structures and honeycomb-based specimen. *Appl. Mech. Mater.*, **121-126**, 1264–1268.
5. Wu S. J., Zhu L. Q., Feng Q. B. et al. (2012) Digital shearography with in situ phase shift calibration. *Opt. Lasers Eng.*, **50**, 1260–1266.
6. Xie X., Xu N., Sun J. F. et al. (2013) Simultaneous measurement of deformation and the first derivative with spatial phase-shift digital shearography. *Opt. Commun.*, **286**, 277–281.
7. Лобанов Л. М., Знова В. Я., Пивторак В. А. Киянец И. В. (2014) Технология неразрушающего контроля качества элементов и узлов авиационных конструкций методом

электронной ширографии. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **3**, 15–18.

8. Лобанов Л. М., Знова В. Я., Пивторак В. А. Киянец И. В. (2015) Контроль коррозионных повреждений элементов и узлов авиационных конструкций методом электронной ширографии. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **2**, 5–9.
9. Патон Б. Е., Лобанов Л. М., Лысак В. В., Кныш В. В. и др. (2014) Бездеформационная сварка стрингерных панелей из титанового сплава ВТ20. *Автоматическая сварка*, **9**, 7–9.
10. 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**, 10–13.

**References**

1. Hung, Y.Y., Ho, H.P. (2005) Shearography: An optical measurement technique and applications. *Mater. Sci. & Engin.*, **49**, 61-87.
2. Collrep, J., Krupka, R., Siebert, T. (2007) Industrial applications of shearography for inspection of aircraft components. *NDT World Review*, **36**(6), 28-31.
3. Lobanov, L.M., Pivtorak, V.A., Savitskaya, E.M., Kiyaneets, I.V. (2008) Diagnostics of components and assemblies of structure with application of electron shearography method. *Tekh. Diagnost. i Nerazruch. Kontrol*, **4**, 7-13 [in Russian].
4. Feng, H.J., Zhang, J., Liu, Kh.K. (2012) Studies on digital shearography for testing of aircraft composite structures and honeycomb-based specimen. *Appl. Mech. Mater.*, **121-126**, 1264-1268.
5. Wu, S.J., Zhu, L.Q., Feng, Q.B. et al. (2012) Digital shearography with in situ phase shift calibration. *Opt. Laser Eng.*, **50**, 1260-1266.
6. Xie, X., Xu, N., Sun, J.F. et al. (2013) Simultaneous measurement of deformation and the first derivative with spatial phase-shift digital shearography. *Opt. Commun.*, **286**, 277-281.
7. Lobanov, L.M., Znova, V.Ya., Pivtorak, V.A., Kiyaneets, I.V. (2014) Technology of non-destructive testing of the quality of elements and components of aircraft structures by electron shearography method. *Tekh. Diagnost. i Nerazruch. Kontrol*, **3**, 15-18 [in Russian].
8. Lobanov, L.M., Znova, V.Ya., Pivtorak, V.A., Kiyaneets, I.V. (2015) Monitoring corrosion damage of elements and components of aircraft structures by the method of electron shearography. *Ibid.*, **2**, 5-9 [in Russian].
9. Paton, B.E., Lobanov, L.M., Lysak, V.L. et al. (2014) Deformation-free welding of stringer panels of titanium alloy VT20. *The Paton Welding J.*, **9**, 6-16.
10. Lobanov, L.M., Pivtorak, V.A., Savitsky V.V., Tkachukm G.I. (2006) Procedure for determination of residual stresses in welded joints and structural elements using electron speckle-interferometry. *Ibid.*, **1**, 24-29.

Л. М. ЛОБАНОВ, В. А. ПИВТОРАК

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

**ОПЕРАТИВНИЙ КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ І НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ЗВАРНИХ ПАНЕЛЕЙ ЗІ СПЛАВУ ВТ-20 МЕТОДАМИ ЦИФРОВОЇ ШИРОГРАФІЇ І СПЕКЛ-ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ**

Розроблено технології неруйнівного контролю якості та визначення залишкових напружень зварних конструкцій на основі методів цифрової ширографії і спекл-інтерферометрії. Представлені результати діагностування якості зварних титанових панелей зі сплаву ВТ-20, виготовлених з попереднім пружним розтягуванням, і визначення залишкових напружень в елементах зварних панелей. Показана ефективність використання методів цифрової ширографії і спекл-інтерферометрії для діагностики якості та визначення залишкових напружень

в элементах титановых панелей без демонтажу оснащения для розтягування, що дозволяє при необхідності відразу приступити до усунення дефектів. Бібліогр. 10, рис. 11.

Ключові слова: неруйнівний контроль якості, визначення напруженого стану, діагностика тонкостінних панелей, цифрова ширографія, електронна спекл-інтерферометрія

L. M. LOBANOV, V. A. PIVTORAK

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

OPERATIONAL CONTROL OF THE QUALITY AND STRESSED STATE OF WELDED PANELS FROM VT-20 ALLOY BY DIGITAL SHEAROGRAPHY METHODS

Technologies of nondestructive testing of the quality and determination of residual stresses in welded structures based on the methods of digital shearography and speckle-interferometry were developed. The paper presents the results of diagnostics of the quality of welded titanium panels from VT-20 alloy, made with elastic pre-tension and determination of residual stresses in welded panel elements. The effectiveness of application of the methods of digital shearography and speckle-interferometry is shown for diagnostics of quality and determination of residual stresses in titanium panel elements without dismantling the fixtures for tension application that allows, if required, immediately proceeding to elimination of the defects.

Keywords: nondestructive quality testing, stressed state determination, diagnostics of thin-walled panels, digital shearography, electronic speckle-interferometry.

Поступила в редакцію  
04.05.2018



## VIII СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА «МЕТАЛЛ. ОБОРУДОВАНИЕ. ИНСТРУМЕНТ»

25–27 апреля во Дворце спорта «Украина» (г. Львов) прошла VIII специализированная выставка «Металл. Оборудование. Инструмент». Выставка была организована компанией ТОВ «ЕхпоЛьвів». Информационную поддержку выставки обеспечили журналы «Автоматическая сварка», «Оборудование и инструмент для профессионалов», «Металл дайджест» и другие.

**Тематика выставки включала следующие темы:**

- оборудование для обработки металлов
- металлорежущие станки и приспособления
- плазменное оборудование и технологии
- оборудование для раскроя листа и проката
- металлорежущие инструменты
- сварочное оборудование
- кузнечное оборудование и изделия
- ручной электроинструмент
- абразивный, алмазный, прецизионный инструмент
- пневматический и гидравлический инструмент
- слесарный и монтажный инструмент
- металлоизделия, изделия для соединения и крепежа
- средства защиты

В выставке приняли участие свыше 50 компаний, представляющих производство, торговлю, а также дистрибьютеры из разных областей Украины.

Среди участников такие известные компании как «Fronius Ukraine», «Бинцель Украина», ООО «Дельта – Современные технологии», «Саммит», «Техмаш» и другие.



Программа выставки включала проведение ряда тематических семинаров, презентаций, которые позволили обеспечить уникальную возможность специалистам повысить уровень профессиональных знаний и обменяться опытом при личном общении.

Выставка «Металл. Оборудование. Инструмент» стала местом встречи ведущих специалистов в области машиностроения, металлообработки и других отраслей промышленности и послужила мощным информационным источником.

## НОВЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ (ОБЗОР)

С. Ю. ПЛЕСНЕЦОВ, Г. М. СУЧКОВ, А. И. КОРЖ, М. Д. СУВОРОВА

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт». 61002, г. Харьков, ул. Кирпичева, 2.  
E-mail: [hpi.suchkov@gmail.com](mailto:hpi.suchkov@gmail.com)

Выполнен анализ информационных источников за последние годы, в которых приведены результаты теоретических и модельных исследований электромагнитно-акустического способа возбуждения и приема ультразвуковых волн объемного, поверхностного и нормального типов. Установлено, что комплексными теоретическими и модельными исследованиями создаются более эффективные основы конструирования ЭМА преобразователей различного назначения. Показана возможность создания ЭМАП с фазированными решетками, а также устройств с импульсными источниками поляризуемого магнитного поля. Библиогр. 25, рис. 4.

*Ключевые слова:* электромагнитно-акустическое преобразование, свойства материалов, неразрушающий контроль, измерения, диагностика, толщинометрия, моделирование

Многие исследователи из разных стран выполняют теоретические, модельные и практические исследования, направленные на разработку электромагнитно-акустических (ЭМА) приборов. Однако уровень сложности и многообразие проблем, решаемых при исследованиях и создании средств контроля и диагностики на базе ЭМА преобразователей (ЭМАП), оказался настолько высоким, а перспективы, открывающиеся при этом столь значительными, что результаты, достигнутые в прошлом в этой области, не могут быть исчерпывающими.

В журнале «Дефектоскопия» в виде обзоров до 2005 г. [1–3] рассмотрены вопросы, связанные с проблемами исследований, разработки и реализации средств электромагнитно-акустических измерений, контроля и диагностики оборудования, изделий и материалов. Достаточно широко достижения, связанные с ЭМА способом, представлены в справочнике [4]. За прошедшие 10–15 лет выполнено много новых работ в этом направлении. Возникла необходимость в их анализе, систематизации и определении путей дальнейшего развития ЭМА метода и средств его реализации. Поскольку количество публикаций оказалось значительным, обзор информационных источников выполнен в несколько этапов: теоретические вопросы; ЭМА преобразователи; специальные элементы ЭМА приборов; возможности средств контроля с ЭМА преобразователями; установки и приборы для толщинометрии, дефектоскопии, измерений и диагностики; особенности метрологического обеспечения.

Целью работы является анализ новых литературных источников и установление тенденций

развития средств измерений, контроля и диагностики с использованием ЭМА способа возбуждения и приема ультразвуковых волн.

**Анализ теоретических и модельных исследований.** Ермолов И. Н. в работе [5] рассмотрел «...достижения в теоретических вопросах ультразвуковой дефектоскопии примерно за 20 прошедших лет». Им показано, что в последнее время наметились тенденции использования новых или мало применяемых типов ультразвуковых волн, которые раньше почти не использовались для диагностики объектов различного вида. В связи с этим возникают проблемы теоретического и практического характера. Значительное количество существенных проблем контроля может быть решено с применением ЭМА преобразователей. При этом Ермолов И. Н. указывает на недостаточность разработок специального оборудования для реализации ЭМА метода в промышленности: ЭМАП, генераторов мощных импульсов, усилителей, быстросрабатывающих систем обработки информации.

Сазонов Ю. И. в работе [6] указывает на то, что исследования макро- и микроскопических механизмов ЭМА преобразования различного вида является одной из наиболее важных и, в то же время, сложных проблем радиофизики, физической и прикладной акустики, физики твердого тела, физики магнитных явлений, теплофизики и молекулярной физики. Исследование ЭМА эффектов является нетипичной задачей электродинамики взаимодействующих тел и полей разного типа и структуры. Изучение ЭМА эффекта дает возможность лучше понять физические процессы генерации, распространения и приема ультразвуковых волн электромагнитными методами, что

© С. Ю. Плеснецов, Г. М. Сучков, А. И. Корж, М. Д. Суворова, 2018



важно для построения общей теории и создания разного рода устройств и преобразователей, т. е. ставится задачи построения общей теории ЭМА преобразования; создания научных основ конструирования ЭМАП и необходимого специального оборудования.

За последние 15 лет группой исследователей в составе Мужижкого В. Ф., Комарова В. А., Ремезова В. Б., которые считаются на постсоветском пространстве ведущими теоретиками, опубликовано более 50 теоретических статей в журналах «Дефектоскопия», «Контроль. Диагностика», «В мире неразрушающего контроля», направленных на исследование механизмов прямого, обратного и двойного ЭМА преобразования в приложении к толщиномерии и дефектоскопии в нормальном и тангенциальном поляризующих полях в основном для накладных ЭМАП. Во всех этих статьях, по сравнению с аналогичными работами, выполненными в прошлом веке Буденковым Г. А., Глуховым Н. А., Сазоновым Ю. И., Шкарлетом Ю. М., Шубаевым С. Н. и др., рассмотрены частные задачи, в которых не найдены новые принципиальные научные решения по созданию общей теории ЭМА преобразования. Отсутствуют также разработки основных положений, которые бы дали возможность конструировать ЭМА преобразователи на базе таких исследований. Одной из типичных работ по оценке коэффициента ЭМА преобразования является статья [7]. Авторы по-прежнему приводят давно известные данные трех типов (видов) взаимодействия ЭМАП и металла.

При возбуждении:

1. Взаимодействие вихревых токов  $i_b$  длиной  $dl$  с индукцией поля подмагничивания  $B_0$  (сила Ампера  $F_A$ ):

$$F_A = i_b [dl B_0].$$

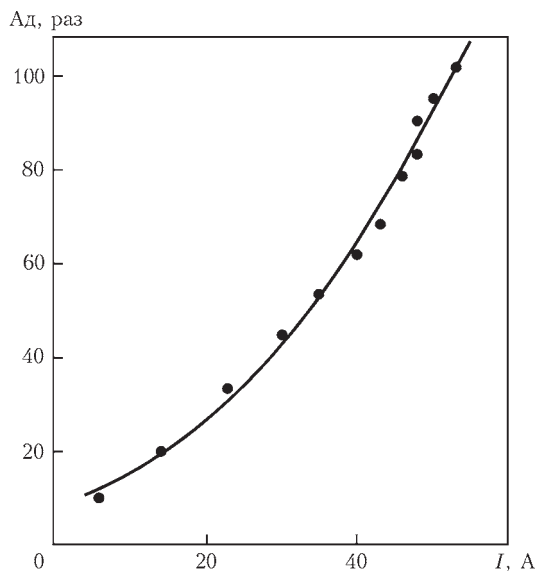


Рис. 1. Влияние значения тока в катушке прямого ЭМАП на амплитуду эхо-импульса от плоскостонного отражателя диаметром 4 мм, зазор – 0,2 мм [8]

2. Взаимодействие вихревых токов  $i_b$  с током  $i_k$  высокочастотного индуктора, порождающего вихревой ток, с силой  $F$ :

$$F = \frac{M_0}{4\pi} = \frac{2i_b i_k}{h} dl,$$

где  $h$  – зазор между индуктором и объектом контроля;  $dl$  – средняя длина вихревого тока.

3. Прямые магнитострикционные эффекты. В частности, сила магнитострикционной природы  $F$  при продольной линейной магнитострикции (эффект Джоуля) определяется:

$$F = \sigma_m S = \alpha B_m S,$$

где  $\sigma_m$  – напряжения в акустической волне;  $S$  – площадь ЭМА преобразователя;  $\alpha$  – магнитострикционная постоянная;  $B_m$  – индукция переменного магнитного поля.

В то же время экспериментальные данные [8], рис. 1, показывают, что при возбуждении объемных сдвиговых ультразвуковых импульсов, при прочих одинаковых условиях, отраженная от плоскостонного отражателя диаметром 4 мм амплитуда сигнала имеет нелинейную зависимость от величины тока в индукторе ЭМАП. Это говорит о необходимости совершенствования теории ЭМА преобразования.

Прием акустических волн обусловлен:

– электромагнитными полями, порождаемыми вихревыми токами в приповерхностном слое объекта, колеблющегося со скоростью  $v$  в поле подмагничивания с индукцией  $B_0$ . При этом напряженность переменного магнитного поля  $E = [vB_m]$ , а э.д.с. индукции  $\epsilon_i = [vB_0]dl$ ;

– электромагнитными полями, возникающими за счет обратных магнитострикционных или магнитоупругих эффектов (Маттеучи, Вилари) при деформации металла акустической волной с напряжениями  $\sigma_m$ . При этом индукция переменного магнитного поля  $B_m = \sigma_m \cdot A$  ( $A$  – постоянная чувствительности), а э.д.с. индукции  $\epsilon_i = -SdB/dt = -SA\omega\sigma_m$ , где  $\omega$  – частота переменного магнитного поля.

Результаты экспериментальных исследований [9, 10] чувствительного двойного ЭМА преобразования показали, что одновременно со сдвиговыми линейно поляризованными волнами возбуждаются и принимаются нормально к поверхности плоскопараллельного изделия другие типы волн (рис. 2, поз. 1, 2 и 3). При использовании эхо-метода контроля такие когерентные сигналы будут осложнять анализ результатов дефектоскопии. Эффект появления дополнительных ультразвуковых сигналов до настоящего времени теоретически не исследован. В то же время обнаруженный эффект может найти широкое применение для одновременного определения скоростей объемных волн, упругих постоянных и для безэтальной

толщинометрии одного и того же объема объекта контроля (ОК) одним ЭМАП.

Следовательно, невзирая на значительные объемы ранее выполненных теоретических исследований, до настоящего времени решены далеко не все необходимые для практических разработок научно-технические задачи, в первую очередь комплексно учитывающие все факторы, определяющие процесс ЭМА преобразования. Следовательно можно сделать вывод, что практически все теоретические исследования выполнены для конкретных типов материалов и их состояния, для упрощенных моделей высокочастотных катушек ЭМАП, например, типа «виток» [11], работа которого была рассмотрена еще в семидесятых годах прошлого столетия Шкарлетом Ю. М. В то же время, как определили Ермолов И. Н. и Сазонов Ю. И. [5, 6] с учетом ранее выполненных теоретических работ, современные задачи ЭМА контроля должны быть направлены на создание средств контроля и в первую очередь ЭМАП и специального оборудования, обеспечивающего его эффективную работу.

В последние годы группа ученых из Ижевска под руководством Муравьевой О. В., Муравьева В. В. и Мурашова С. А. опубликовала более 30 теоретических и модельных статей, направленных на ЭМА контроль стержней, труб и аналогичных изделий. Выполнены ограниченные исследования локальных процессов преобразования, диаграмм направленности синфазных и противофазных ЭМА преобразователей при разных размерах и расположении элементов высокочастотных катушек и намагничивающей системы. Из этих разработок следует отметить эффективность применения моделирования магнитных, электромагнитных и акустических полей ЭМАП с помощью современного программного пакета COMSOL Multiphysics. Аналогичный подход эффективно использован в работе [12] при формировании поляризующего магнитного поля преобразователя, что позволило создать высокоэффективный ЭМАП для контроля волнами Релея. Совместно с аналитическими решениями задач ЭМА преобразования применение

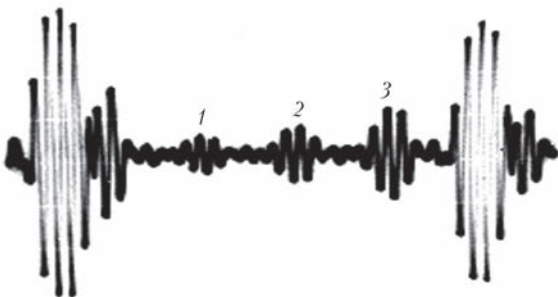


Рис. 2. Реализация на экране осциллографа с изображением двух донных импульсов, между которыми расположены три дополнительных сигнала [9]

современных расчетных пакетов может существенно улучшить возможности разработок ЭМА преобразователей.

Значительная часть исследователей направили усилия на создание средств ЭМА контроля [13] за счет широкого применения моделирования и теоретических исследований. Чабанов В. Е. и Жуков В. А. рассмотрели проблемы, связанные с конструированием ЭМАП [14] и утверждают, что для эффективной разработки ЭМАП необходимо учитывать не менее 35 параметров. Полученная ими математическая модель, учитывающая 38 параметров, определяет напряженность  $\sigma_{R0}(\theta, \varphi, t)$  SV-поляризованных волн, излучаемых одним токопроводом, и напряженность  $\sigma_{R\varphi}(\theta, \varphi, t)$  SH-поляризованных волн

$$\sigma_{R0}(\theta, \varphi, t) = \frac{iDW_{\varphi}(\theta, \varphi) \operatorname{sinc}(k_i L \sin \theta \cos \frac{\varphi}{2}) \operatorname{sinc}(k_i a \sin \theta \cos \varphi) \psi(\theta, \varphi) \cos \theta f(t)}{RZ(\theta)}$$

$$\sigma_{R\varphi}(\theta, \varphi, t) = \frac{-DW_0(\theta, \varphi) \operatorname{sinc}(k_i L \sin \theta \cos \frac{\varphi}{2}) \operatorname{sinc}(k_i a \sin \theta \cos \varphi) \psi(\theta, \varphi) \cos \theta f(t)}{RZ(\theta)}$$

где  $\theta, \varphi$  – углы наблюдения соответственно в вертикальной и горизонтальной плоскостях сферической системы координат в момент времени  $t$ ;  $i$  – мнимая единица;

$$D = \left(\frac{\pi}{2}\right)^{\frac{1}{2}} \mu_0 B_0 \sigma_2 c_t I_0 L,$$

где  $\mu_0$  – абсолютная магнитная проницаемость;  $B_0$  – индукция вертикальной составляющей постоянного магнитного поля с учетом ее пространственной неоднородности;  $\sigma_2$  – удельная электрическая проводимость материала контроля;  $c_t$  – скорость поперечных волн в материале контроля;  $I_0$  – ток, протекающий по токопроводу;  $L$  – длина работающей части токопровода катушки, расположенного под постоянным магнитом;

$$W_0 =$$

$$[M(\sin^2 \theta \cos^2 \varphi F_2 + F_3) + 2F_1 q \sin^2 \theta] \cos \theta \cos \varphi - \frac{\cos \varphi \sin^2 \theta \{2q q_t (2F_2 \sin^2 \theta \sin^2 \varphi - 2F_3 - q_t F_1)\}}{q_t};$$

$$M = -\cos(2\theta);$$

$$F_1 = M[2q_2(q_2 - q)] + \frac{2\sin^2 \theta - p^2 m^2}{l(m^2 - p^2)} + \frac{q_2}{q_2 - q_t} + \frac{2(q_2)^2}{m^2 - 1};$$

$$F_2 = \frac{1}{q_2 - q} + \frac{2q_2}{m^2 - p^2} + \frac{q_2 + q_{t1}}{2q_t(q_2 - q_t)} + \frac{2q_2}{m^2 - 1};$$

$$F_3 = \frac{\sin^2 \theta \sin^2 \varphi}{q_2 - q} + \frac{q_2(2\sin^2 \theta \sin^2 \varphi)}{m^2 - p^2} +$$

$$+ \frac{q_2(q_t + \sin^2 \theta \sin^2 \varphi) - q \sin^2 \theta \cos^2 \varphi}{2q_t(q_2 - q_t)} + \frac{q_2(2\sin^2 \theta \sin^2 \varphi - m^2)}{m^2 - 1};$$

$$q = -i(p^{-2} - \sin^2 \theta)^{\frac{1}{2}}, \quad q_t = -i \cos \theta,$$

$$q_2 = -i(m^2 - \sin^2 \theta)^{\frac{1}{2}};$$

$$p = \frac{k_t}{k} = \frac{c}{c_{t1}}, \quad m = \frac{k_2}{k_t};$$

$$\begin{aligned} \Psi(\theta, \varphi) = & 2 \{ Q_3 [ Q_3 \operatorname{sh}(k_t q_3 s) + Q_4 \operatorname{ch}(k_t q_3 s) ] \times \\ & \times [ e^{k_t q_1 (H-h)} - S(\theta, \varphi) e^{k_t q_1 (H-h)} ] + \\ & + Q [ Q_3 \operatorname{ch}(k_t q_3 s) + Q_4 \operatorname{sh}(k_t q_3 s) ] [ e^{k_t q_1 (H-h)} + \\ & + S(\theta, \varphi) e^{k_t q_1 (H-h)} ] \} \times \\ & \times \{ Q_1 \operatorname{ch}(k_t q_1 H [ Q_3 \operatorname{ch}(k_t q_3 s) (Q_2 + Q_4) + \\ & + \operatorname{sh}(k_t q_3 s) (Q_3^2 + Q_2 Q_4) ] + \\ & + \operatorname{sh}(k_t q_1 H) \left[ \begin{aligned} & Q_3 \operatorname{ch}(k_t q_3 s) (Q_2 Q_4 + Q_1^2) + \\ & + \operatorname{sh}(k_t q_3 s) (Q_2 Q_3^2 + Q_1^2 Q_4) \end{aligned} \right] \}^{-1}; \end{aligned}$$

$$Q_1 = \frac{q_j}{\mu_j}; \quad q_j = (\sin^2 \theta - \frac{k_j^2}{k_t^2})^{\frac{1}{2}};$$

$s$  – толщина экрана;  $H$  – расстояние между экраном и поверхностью объекта контроля;  $h$  – расстояние между токопроводами катушки и поверхностью металла;

$$S_3 = \operatorname{sinc}(k_t a_3 \sin \theta \sin \frac{\theta}{2}) \times$$

$$\times \operatorname{sinc}(k_t L_0 \sin \theta \cos \frac{\theta}{2}) e^{-ik_t \sin \theta (x_0 \cos \varphi + y_0 \sin \varphi)},$$

$R$  – расстояние от центра токопровода до точки наблюдения;

$$Z(\theta) = \cos^2(2\theta) + 2 \sin \theta \sin(2\theta) (p^{-2} - \sin^2 \theta)^{\frac{1}{2}},$$

$k_j^2 = \omega \mu_j c_0^{-2} (\omega \varepsilon_j - \frac{i\sigma_j}{\varepsilon_0})$  – волновое число электромагнитных волн;  $\omega$  – круговая частота работы преобразователя;  $\varepsilon_0$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость;  $x_0$  и  $y_0$  – смещение центральной части рассматриваемого токопровода относительно центра преобразователя.

Следует отметить, что подробного анализа полученной математической модели авторы не провели, уделив основное внимание эксперименталь-

ным разработкам, что снижает ценность таких исследований. Не представлена методика анализа предложенной сложной математической модели.

Авторы работ [15–20] на базе теории Власова К. Б., теоремы Шокли–Рамо и теоремы Дж. Маллинсона пошли по пути комплексного построения математических моделей, позволяющих создавать и производить расчеты любых конструкций ЭМАП. В работах определены основы возбуждения поверхностных и крутильных колебаний. Авторами была выведена теорема о наведенном магнитном потоке, которая позволяет создавать средства конструирования ЭМА преобразователей

$$\Phi(t) = \frac{\mu_0}{2} \iiint_V [ \vec{R}(x_k) \times \vec{j}(x_k, t) ] \cdot \vec{\Psi}^{np}(x_k, G) dV,$$

где  $dV = d\vec{l} d\vec{S}$ ;  $\vec{\Psi}^{np}(x_k, G)$  – векторная функция, зависящая от координат точки наблюдения и набора геометрических параметров электрического контура (символ  $G$  в списке аргументов функции), которая описывает пространственное распределение компонентов вектора напряженности магнитного поля  $\vec{H}^{np}(x_k)$ ;  $\vec{j}(x_k, t)$  – результирующая плотность тока проводимости, сформированная ультразвуковыми смещениями.

На основе теоремы о наведенном магнитном потоке разработана математическая модель, которая позволяет выполнять расчет э.д.с., наводимой на индукторе преобразователя любой формы и конструкции. Модель получена для гармонически изменяющегося во времени тока проводимости  $\vec{j}(x_k, t) = \vec{j}(x_k) e^{i\omega t}$ . При этом амплитудное значение разности электрических потенциалов  $U_0(\omega)$  на клеммах электрического контура приемника переменного магнитного поля определено в соответствии с законом Фарадея

$$U_0(\omega) = -i\omega \frac{\mu_0}{2} \iiint_V [ \vec{R}(x_k) \times \vec{j}(x_k) ] \cdot \vec{\Psi}^{np}(x_k, G) dV.$$

Это выражение имеет смысл математической модели процесса регистрации упругих колебаний в электропроводных неферромагнитных материалах с помощью ЭМП, т. е., конкретизировав  $\vec{\Psi}^{np}(x_k, G)$ , мы всегда рассчитаем оптимальный вариант ЭМАП нужного назначения. Таким образом, в работах [15–20] фактически решена обобщенная задача по ЭМА преобразованию, но для ограниченных разновидностей ультразвуковых волн. При выполнении этих теоретических и модельных исследований учтены нелинейные свойства ферромагнитных материалов и их анизотропия; зависимости электромагнитных свойств от химического состава, величин постоянного и переменного магнитных полей; механизмы возникновения магнитоупругих токов в различных ситуациях при контроле ферромагнитных и неферромагнитных материалов.

В результате аналитически получены волновые и частотные характеристики моделей ЭМА преобразователей с учетом всех действующих факторов при возбуждении волн Релея и крутильных колебаний в трубчатых или стержневых изделиях. Однако разработанный авторами подход целесообразно применить и для других типов ультразвуковых волн.

Дальнейшее развитие теоретических, модельных и экспериментальных исследований нашло в диссертационной работе Мышкина А. В. [21]. Автором разработана физико-математическая модель формирования акустических полей многоэлементных УЗ преобразователей, базирующаяся на теории сосредоточенных источников, обобщенная на случай ЭМАП, учитывающая конструктивные параметры (апертура, количество элементов и зазоры между ними, зазор между ЭМАП и ОК), параметры возбуждения (рабочая частота, амплитудное распределение силового воздействия, фокусировка, угол ввода, режим работы), упругие и электромагнитные свойства ОК, тип излучаемой волны. При расчетах применен упрощенный подход, т. к. использован только вихреоточковый силовой механизм возбуждения ультразвуковых волн

$$F_0 = [\vec{j} \vec{B}_0] = \frac{i\omega\mu_2\mu_0 [\vec{j} \vec{B}_0] e^{-i\omega t} e^{k_2 z}}{2\pi k_2} \times \left( \arctg \frac{x + \frac{e}{2}}{h} \arctg \frac{x - \frac{e}{2}}{h} \right),$$

где  $\vec{j}$  – плотность тока в индукторе;  $h$  – зазор;  $e$  – ширина токопровода;  $\omega$  – частота;  $\sigma$  – электропроводность металла;  $\mu_2\mu_0$  – магнитная проницаемость металла (для немагнитных металлов  $\mu_2 = 1$ );  $\vec{B}_0$  – вектор поляризующего поля;  $k_2$  – волновое число электромагнитной волны.

При этом выражение для сосредоточенного источника, формирующего сдвиговую волну, имеет вид

$$\chi(\theta) = j_{\mu \rightarrow}(\theta) = \frac{\cos\theta(1 - 2\sin^2\theta)}{(2\sin^2\theta - 1)^2 + 4\sin^2\theta \cos\theta \sqrt{\gamma^2 - \sin^2\theta}}$$

Соответственно амплитуда колебаний единичного элемента фазированной решетки в случае ЭМАП для поперечной волны при ориентации поляризующего магнитного поля нормально к поверхности ОК имеет вид

$$A_{nV} = \frac{jB_{0Se}}{4\pi\mu r} e^{-k_r h \sin\theta}$$

Следует отметить интересный для практики контроля тонких изделий научный результат, отраженный в работе Мышкина А. В. [21, с.58]: расчетные и экспериментальные данные показали, что сдвиговые волны в начале ближней зоны излучения прямого ЭМАП направлены практически нормально к поверхности ОК и имеют структуру близкую к однородной (рис. 3). Эти данные соответствуют результатам, приведенным в справочнике [4], где утверждается наличие «прожекторного» участка в начале ближней зоны прямого пьезопреобразователя (продольные волны), а также для прямого емкостного излучателя продольных ультразвуковых волн [22]. Следовательно, этот физический эффект является универсальным. Важно, что чувствительность к дефектам в этой зоне будет примерно одинаковой.

Дальнейшее совершенствование теоретических и модельных исследований ЭМАП выполнено в диссертационной работе Алехина С. Г. [23]. Им разработана математическая модель, в которой постоянное поляризующее магнитное поле преобразователя заменено импульсным. Основой импульсного магнита является катушка, намотанная на ферромагнитный сердечник. Это привело к появлению мощных импульсов шумов Баркгаузена значительной длительности (рис. 4). В результате толщинометрия тонких изделий стала невозможной. Автор также утверждает, что при использовании импульсного магнита индукция нормального магнитного поля достигала 2,7 Тл. При этом амплитуда донного сигнала по сравнению с шумом оказалась незначительной. Например, в работе [10] соотношение величины «донный сигнал/шум» превышает 100 раз при подмагничивающем поле до 1 Тл. Следовательно, работы по импульсному подмагничиванию начатые Малинкой А. В., продолженные Сучковым Г. М. [10] и Алехиным С. Г. [23] являются перспективными и их необходимо продолжать.

Изучая последние известные зарубежные публикации следует отметить, что в теоретическом плане зарубежные исследования несколько за-

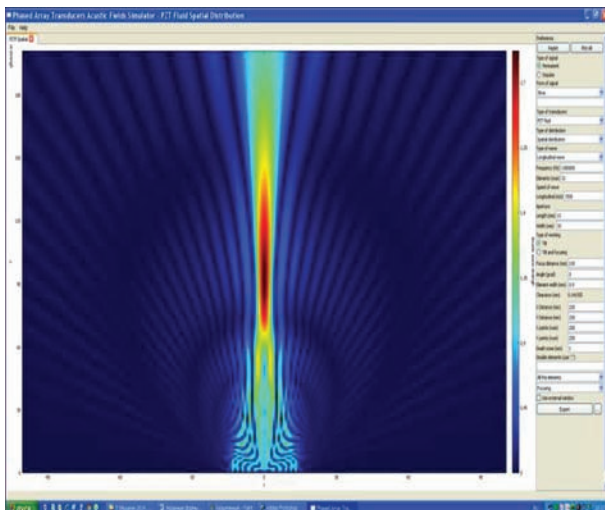


Рис. 3. Диаграмма направленности ЭМАП [21]

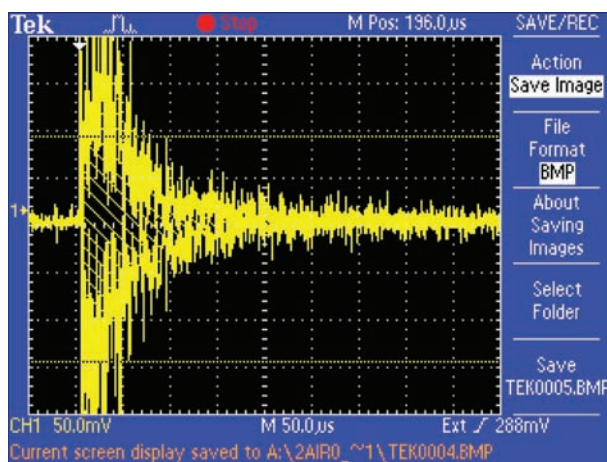


Рис. 4. Шумы Баркгаузена от воздействия импульса магнита [23]

паздывают и, по сути, не отличаются от вышеупомянутых по полученным результатам. Они в большей степени посвящены моделированию, направленному на практическое использование результатов при ультразвуковом ЭМА контроле: дефектоскопии, оценке напряженного состояния и химического состава материалов, влиянию температуры.

В заключение следует отметить, что при анализе докладов по ультразвуку на 18-й Всемирной конференции по неразрушающему контролю (2012 г.) Шевалдыкин В. Г. [24] сделал вывод об уменьшении интереса к работам по развитию и использованию ЭМА метода контроля. С другой стороны, в работе [13] Бобров В. Т., Самокрутов А. А. и Шевалдыкин В. Г. утверждают о значительном интересе мировых разработчиков к исследованиям ЭМА преобразования. Анализ результатов сотен теоретических и практических публикаций подтверждает значительный интерес к разработкам ЭМА преобразователей в составе дефектоскопов, толщиномеров, автоматических и автоматизированных установок. Подтверждением полученного вывода является практическое применение ЭМА способа на практике. Например, ООО «Компания Нординкрафт» [25] за 20 лет разработаны, изготовлены и введены в эксплуатацию свыше 70 установок автоматизированного ультразвукового контроля с применением ЭМАП. В настоящее время установки компании «Нординкрафт» работают на крупнейших металлургических и трубных предприятиях России, Украины, Беларуси, Китая, Швеции, Германии, Вьетнама, Южной Кореи, Японии и др. В числе ключевых клиентов компании – ОАО «Северсталь», ОАО «Волжский трубный завод», ОАО «ЧТПЗ», ОАО «Челябинский металлургический комбинат», ОАО «ММК», ОАО «Выксунский металлургический завод», ОАО «Амурметалл», ОАО «Уральская сталь», ОАО «Уралтрубпром», РУП «Белорусский металлургический комбинат», ОАО «Оскольский

электрометаллургический комбинат», ОАО «Алчевский металлургический комбинат» и др. Очевиден высокотехнологический прорыв по внедрению теоретических и практических результатов по ЭМА преобразованию в промышленность.

### Выводы

1. Известные теоретики за последние 20...30 лет преимущественно решали частные задачи по «механизмам» ЭМА преобразования, в то время как промышленности необходимы разработки принципов и основ построения новых ЭМАП и специального оборудования. На сегодня по-прежнему не существует обобщенной теории ЭМА преобразования, которая бы комплексно учитывала все свойства контролируемого материала, поверхность или объем которого является элементом ЭМА преобразователя: электропроводность, магнитные, упругие и пьезомагнитные характеристики, структуру и анизотропию, наличие деформаций и упругих напряжений, форму поверхности и др., а также конструкцию элементов ЭМАП (высокочастотной катушки или катушек, источника или источников магнитного поля и др.).

2. Теоретически обоснованы и разработаны первые модели устройства с фазированными элементами на базе ЭМА преобразователей, что позволяет выполнять высокопродуктивный контроль качества сварных швов.

3. Выполнены теоретические и практические исследования, по результатам которых разработаны портативные ЭМА толщиномеры с импульсным поляризирующим магнитным полем. Это дает возможность существенно упростить технологию бесконтактного контроля ферромагнитных изделий.

### Список литературы

1. Буденков Г. А., Гуревич Ю.С. (1981) Современное состояние бесконтактных методов и средств ультразвукового контроля (Обзор). *Дефектоскопия*, 5, 5–33.
2. Сучков Г. М. (2005) Современные возможности ЭМА дефектоскопии. *Там же*, 12, 24–39.
3. Сучков Г. М. (2004) Возможности современных ЭМА-толщиномеров. *Там же*, 12, 16–25.
4. Ермолов И. Н., Ланге Ю. В. (2004) *Неразрушающий контроль: справочник: В 7 т.* В. В. Клюев (ред.). Ультразвуковой контроль. Т. 3. Москва, Машиностроение.
5. Ермолов И. Н. (2004) Достижения в теоретических вопросах ультразвуковой дефектоскопии, задачи и перспективы. *Дефектоскопия*, 10, 13–48.
6. Сазонов Ю. И. (2014) Электромагнитно-акустические эффекты в конденсированных средах и физические методы их использования. *XXVII сессия Российского акустического общества, посв. памяти ученых-акустиков ФГУП «Крыловский государственный научный центр» А. В. Смолякова и В. И. Попкова. С.-Петербург, 16–18 апреля 2014.*
7. Буденков Г. А., Коробейников О. В. (2009) Влияние химического состава и температуры металлов на эффективность электромагнитно-акустического преобразования. *Дефектоскопия*, 4, 41–49.

8. Сучков Г. М., Донченко А. В., Десятниченко А. В. и др. (2008) Повышение чувствительности ЭМА приборов. *Там же*, **2**, 15–22.
9. Сучков Г. М. (2001) Исследование особенностей распространения упругих волн, возбуждаемых ЭМА способом. *Контроль. Диагностика*, **12**, 36–39.
10. (2005) *Развитие теории и практики создания приборов для электромагнитно-акустического контроля металлоизделий*: докт. дис. Харьков, НТУ «ХПИ».
11. Ремезов В. Б. (2013) Исследование акустических полей, возбуждаемых излучателем типа «виток» в постоянном магнитном поле. *Дефектоскопия*, **6**, 13–25.
12. Мигущенко Р. П., Сучков Г. М., Петрищев О. Н. и др. (2017) Информационно-измерительные электроакустические преобразователи для оценки качества поверхности ферромагнитных металлоизделий ультразвуковыми волнами Релея. *Технічна електродинаміка*, **2**, 70–76.
13. Бобров В. Т., Самокрутов А. А., Шевальдыкин В. Г. (2014) Состояние и тенденции развития акустических (ультразвуковых) методов, средств и технологий неразрушающего контроля и технической диагностики. *Территория NDT*, **2**, 24–27.
14. Чабанов В. Е., Жуков В. А. (2013) Особенности ультразвукового контроля с применением электромагнитно-акустических преобразователей. *В мире неразрушающего контроля*, **1**, 36–43.
15. Плеснецов С. Ю., Петрищев О. Н., Мигущенко Р. П., Сучков Г. М. (2017) Моделирование процесса электромагнитно-акустического преобразования при возбуждении крутильных волн. *Технічна електродинаміка*, **3**, 79–88.
16. Plesnetsov S. Yu., Petrishchev O. N., Mygushchenko R. P., Suchkov G. M. (2018) Simulation of electromagnetic-acoustic conversion process under torsion waves excitation. Part 2. *Tekhnichna Elektrodynamika*, **1**, 30–36.
17. Plesnetsov S. Yu., Petrishchev O. N., Mygushchenko R. P., Suchkov G. M. (2018) Simulation of electromagnetic-acoustic conversion process under torsion waves excitation. Part 3. *Ibid*, **3**, 10–19.
18. Сучков Г. М., Петрищев О. Н., Плеснецов С. Ю. (2016) *Разработка основ электромагнитно-акустического возбуждения крутильных волн в трубчатых металлоизделиях. Тезисы XXII Міжнародної н.-пр. конф. «Фізичні та комп'ютерні технології», 7–9 грудня 2016 р., Харків*, сс. 469–473.
19. Plesnetsov S. Yu., Migushchenko R. P., Petryshchev O. N. et al. (2017) Mathematical modeling of physical processes of electromagnetic field transformation in elastic oscillations field in microthick layers of metals. *Journal of nano- and electronic physics*, **9**, 5.
20. Plesnetsov S. Yu., Petrishchev O. N., Mygushchenko R. P. et al. (2018) Physical principles of non-contact ultrasonic frequency sensors creation for the study of nanocrystalline ferromagnetic materials. *Ibid*, **2**. (Preprint).
21. Мышкин А. В. (2015) *Влияние конструктивных параметров многоэлементных фазированных преобразователей на формирование акустических полей*: автореф. канд. дис. Ижевск, ИЖГТУ.
22. Ноздрачева Е. Л., Сучков Г. М., Петрищев О. Н. (2015) Особенности возбуждения ультразвуковых импульсов емкостным преобразователем. *Зб. наук. праць Донецького національного технічного університету, серія: «Обчислювальна техніка та автоматизація»*, сс. 165–171.
23. Алехин С. Г. (2013) *Толицинометрия металлоконструкций на основе электромагнитно-акустического преобразования в импульсном магнитном поле*: канд. дис. Москва, МНПО «Спектр».
24. Шевальдыкин В. Г. (2012) Краткий анализ тем докладов по ультразвуку 18-й Всемирной конференции по неразрушающему контролю. *Территория NDT*, **3**, 33–34.
25. www.nordinkraft.de
1. Budenkov, G.A., Gurevich, Yu.S. (1981) Modern state of contactless methods and means of ultrasonic testing (Review). *Defektoskopiya*, **5**, 5-33 [in Russian].
2. Suchkov, G.M. (2005) Modern capabilities of EMA flaw detection. *Ibid.*, **12**, 24-39 [in Russian].
3. Suchkov, G.M. (2004) Capabilities of modern EMA thickness meters. *Ibid.*, **12**, 16-25 [in Russian].
4. Ermolov, I.N., Lange, Yu.V. (2004) *Nondestructive testing: Refer. book. In: 7 Vol. Ed. by Klyuev. Vol.3: Ultrasonic testing*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
5. Ermolov, I.N. (2004) Achievements in theoretical problems of ultrasonic flaw detection, objectives and prospects. *Defektoskopiya*, **10**, 13-48 [in Russian].
6. Sazonov, Yu.I. (2014) Electromagneto-acoustic effects in condensed media and physical methods of their application. *In: Proc. of 27th Session of the Russian Acoustic Society dedicated to the memory of acoustic-scientists A.V. Smolyakov and V.I. Popkov of FGUP Krylov State Scientific Center (St.-Petersburg, 16-18 April 2014)* [in Russian].
7. Budenkov, G.A., Korobejnikov, O.V. (2009) Influence of metal composition and temperature on effectiveness of electromagneto-acoustic transformation. *Defektoskopiya*, **4**, 41-49 [in Russian].
8. Suchkov, G.M., Donchenko, A.V. et al. (2008) Improvement of efficiency of EMA instruments. *Ibid.*, **2**, 15-22 [in Russian].
9. Suchkov, G.M. (2001) Investigation of the features of propagation of elastic waves excited by EMA method. *Kontrol. Diagnostika*, **12**, 36-39 [in Russian].
10. (2005) *Advances of the theory and practice of development of instruments for electromagneto-acoustic testing of metal products*. In: Syn. of Thesis for Dr. of Techn. Sci. Degree. Kharkov, NTU KhPI [in Russian].
11. Remezov, V.B. (2013) Investigation of acoustic fields excited by “coil” type radiators in a constant magnetic field. *Defektoskopiya*, **6**, 13-25 [in Russian].
12. Migushchenko, R.P., Suchkov, G.M., Petrishchev, O.N. et al. (2017) Information-measurement electromechanical transducers for assessment of surface quality of ferromagnetic metal products by ultrasonic Rayleigh waves. *Tekhnichna Elektrodynamika*, **2**, 70-76 [in Russian].
13. Bobrov, V.T., Samokrutov, A.A., Shevaldykin, V.G. (2014) State and tendencies of development of acoustic (ultrasonic) methods, means and technologies of nondestructive testing and technical diagnostics. *Territoriya NDT*, **2**, 24-27 [in Russian].
14. Chabanov, V.E., Zhukov, V.A. (2013) Features of ultrasonic testing with application of electromagneto-acoustic transducers. *V Mire Nerazrush. Kontrolya*, **1**, 36-43 [in Russian].
15. Plesnetsov, S.Yu., Petrishchev, O.N., Mygushchenko, R.P., Suchkov, G.M. (2018) Simulation of electromagneto-acoustic conversion process under torsion waves excitation. *Tekhnichna Elektrodynamika*, **3**, 79-88 [in Russian].
16. Plesnetsov, S.Yu., Petrishchev, O.N., Mygushchenko, R.P., Suchkov, G.M. (2018) Simulation of electromagneto-acoustic conversion process under torsion waves excitation. Pt. 2. *Ibid.*, **1**, 30-36 [in Russian].
17. Plesnetsov, S.Yu., Petrishchev, O.N., Mygushchenko, R.P., Suchkov, G.M. (2018) Simulation of electromagneto-acoustic conversion process under torsion waves excitation. Pt. 3. *Ibid.*, **3**, 10-19 [in Russian].
18. Suchkov, G.M., Petrishchev, O.N., Plesnetsov, S.Yu. (2016) *Development of fundamentals of electromagneto-acoustic excitation of torsion waves in tubular metal products. In: Abstr. of Papers of 22nd Int. Sci.-Pract. Conf. on Physical and Computer Technologies (7-9 December 2016, Kharkiv)*, 469-473.
19. Plesnetsov, S.Yu., Migushchenko, R.P., Petryshchev, O.N., et al. (2017) Mathematical modeling of physical processes of electromagnetic field transformation in elastic oscillations field in microthick layers of metals. *J. of Nano- and Electronic Physics*, **9**, 5.
20. Plesnetsov, S.Yu., Petrishchev, O.N., Mygushchenko, R.P. et al. (2018) Physical principles of non-contact ultrasonic frequency sensors creation for the study of nanocrystalline ferromagnetic materials. *Ibid.*, **2**.
21. Myshkin, A.V. (2015) *Influence of design parameters of multielement phased transducers on formation of acoustic*

References

- fields. *Syn. of Thesis for Cand. of Techn. Sci. Degree.* Izhevsk, IzhGTU [in Russian].
22. Nozdrachyova, E.L., Suchkov, G.M., Petrishchev, O.N. (2015) Features of excitation of ultrasonic pulses by a capacitive transducer. In: *Transact. of DNTU, Series: Computational systems and automation*, 165-171 [in Russian].
  23. Alyokhin, S.G. (2013) *Thickness measurement in metal structures based on electromagneto-acoustic transformation in a pulse magnetic field. Syn. of Thesis for Cand. of Tekhn. Sci. Degree.* Moscow, MNPO Spektr [in Russian].
  24. Shevaldykin, V.G. (2012) Brief analysis of the topics of presentations on ultrasound at the 18th World Conf. on Nondestructive Testing. *Territoriya NDT*, 3, 33-34 [in Russian].
  25. www.nordinkraft.de

С. Ю. ПЛЕСНЕЦОВ, Г. М. СУЧКОВ, А. И. КОРЖ,  
М. Д. СУВОРОВА

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут. 61002, м. Харків, вул. Кирпичева, 2.  
E-mail: hpi.suchkov@gmail.com

НОВІ ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ І РОЗРОБКИ В ГАЛУЗІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНО-АКУСТИЧНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ (ОГЛЯД)

Виконано аналіз інформаційних джерел за останні роки, в яких приведені результати теоретичних і модельних досліджень електромагнітно-акустичного способу збудження і прийому ультразвукових хвиль об'ємного, поверхневого і нормального типів. Встановлено, що комплексними теоретичними і модельними дослідженнями створюються більш ефективні основи конструювання ЕМА перетворювачів різного призначення. Показана можливість створення ЕМАП з фазованими

решітками, а також пристроїв з імпульсними джерелами поляризованого магнітного поля. Бібліогр. 25, рис. 4.

Ключові слова: електромагнітно-акустичні перетворення, властивості матеріалів, неруйнівний контроль, вимірювання, діагностика, товщинометрія, моделювання

S. Yu. PLESNETSOV, G. M. SUCHKOV, A. I. KORZH,  
M. D. SUVOROVA

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

NEW THEORETICAL INVESTIGATIONS AND DEVELOPMENTS IN THE FIELD OF ELECTROMAGNETO-ACOUSTIC TRANSFORMATION (REVIEW)

Analysis was performed of information sources over the recent years, which give the results of theoretical and model studies of electromagneto-acoustic method of excitation and reception of ultrasonic waves of body, surface and normal types. It is found that comprehensive theoretical and model studies allow establishing more effective principles of design of various purpose EMA transducers. The possibility of development of EMAT with phased arrays, as well as devices with pulsed sources of polarizing magnetic field is shown. 25 References 25, 4 Figures.

Keywords: electromagneto-acoustic transformation, material properties, nondestructive testing, measurement, diagnostics, thickness measurement, modeling

Поступила в редакцію  
24.04.2018

**ДЕВЯТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
«Математическое моделирование и  
информационные технологии в сварке  
и родственных процессах»**

Посвящается 100-летию Национальной академии наук Украины

Украина, Одесса, отель «Курортный»  
10 – 14 сентября 2018 г.



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

Для участия в конференции необходимо заполнить регистрационную карточку и вместе с тезисами доклада направить ее в Оргкомитет до 20 июня 2018 г. К началу конференции будут изданы тезисы докладов.

Сборники трудов восьми предыдущих конференций «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах» на сайте: <http://patonpublishinghouse.com/rus/proceedings>

**Оргкомитет**

ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины,  
ул. Казимира Малевича 11,  
г. Киев, 03680, Украина;  
тел./факс: (38044) 200-82-77, 205-22-26  
E-mail: [journal@paton.kiev.ua](mailto:journal@paton.kiev.ua)  
<http://pwi-scientists.com/rus/mmi2018>

**Контрольные даты**

Подача заявок на участие и тезисов докладов	до 20.06.2018 г.
Рассылка второго информационного сообщения и подтверждение участия	до 12.07.2018 г.
Оплата регистрационного взноса	до 11.09.2018 г.

# ЗАСТОСУВАННЯ КРУГОВИХ СТАТИСТИК ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ СИГНАЛІВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

Ю. В. КУЦ<sup>1</sup>, Ю. Ю. ЛИСЕНКО<sup>1</sup>, М. О. РЕДЬКА<sup>1</sup>, О. Д. БЛИЗНЮК<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37.

E-mail: j.lysenko@kpi.ua

<sup>2</sup>Національний авіаційний університет. 03058, м. Київ, просп. Космонавта Комарова, 1.

Розглянуто метод виявлення сигналів ультразвукового неруйнівного контролю на фоні адитивного гауссового шуму. Метод ґрунтується на аналізі кругової дисперсії, яка визначається за фазовою характеристикою досліджуваного сигналу, і не потребує апріорної інформації про параметри моделі сигналу ультразвукового неруйнівного контролю. Наведено результати моделювання процесу виявлення сигналів ультразвукового неруйнівного контролю на фоні шуму. Бібліо-гр. 11, рис. 4.

*Ключові слова:* кругові статистики, кругова дисперсія, виявлення сигналів в шумах, ультразвуковий неруйнівний контроль

Теорія, методи і засоби виявлення сигналів на початку розвитку розроблювались і використовувались для завдань радіолокації [1]. У подальшому ці методи поширились і на інші предметні області – зв'язок, телекомунікацію, технічну та медичну діагностику тощо. Такі методи знаходять застосування і в ультразвуковому неруйнівному контролі (УНК) для виявлення сигналів на фоні шуму [2, 3].

В більшості практичних завдань сигнал, який надходить для аналізу, уявляє адитивну суміш корисної складової, що несе інформацію про об'єкт контролю (ОК) і шумової, що утворюється власними шумами апаратури та шумами середовища. Модель корисної складової розглядається як радіоімпульсний сигнал з відомими обвідною та частотою сигналу-носія. Завдання виявлення полягає у формуванні відповіді на питання: чи містить (з певною ймовірністю) аналізована вибірка корисну складову. У разі позитивної відповіді необхідно оцінити часове положення радіоімпульсу.

Для виділення сигналу на фоні значного шуму використовуються різні методи: оптимальної фільтрації сигналів [3]; узгодженої фільтрації сигналів [4]; застосування сигналів з різними видами модуляції і маніпуляції [5, 6]; кореляційного прийому сигналів [3, 4]; спліт метод [7]; метод вейвлет-аналізу [8]. Всі ці методи потребують знання копії корисної складової сигналу.

Завдання виявлення сигналів УНК мають певну специфіку. По-перше, з метою зменшення мертвої зони і підвищення поздовжньої роздільної здатності корисна складова сигналу УНК повинна бути якомога більш локалізованою в часі. По-друге, реальний сигнал суттєво відрізняється від його моделі, що викликано ефектом Допплера, спо-

творенням сигналу в електроакустичному тракті його передавання, нестабільністю характеристик сигналу за використання генерації сигналу способом ударного збудження тощо. По-третє, нові конструкційні матеріали зазвичай мають підвищені коефіцієнти загасання ультразвукових коливань, що потребує аналізу сигналів за зменшеного відношення сигнал/шум. Ці фактори обумовлюють необхідність удосконалення методів виявлення сигналів для УНК.

В роботах [9, 10] розглянуто метод виявлення сигналів УНК за аналізом кругової дисперсії різниці фазових характеристик корисної складової сигналів та гармонічного сигналу з частотою сигналу-носія. Останній, хоча й не потребує знання повної копії сигналу, але передбачає необхідність апріорної інформації про частоту сигналу-носія. Саме такі специфічні умови часто мають місце в практиці УНК.

Метою роботи є розроблення методу виявлення сигналів УНК на фоні адитивного гауссового шуму, що ґрунтується на аналізі кругової дисперсії, яка визначається за фазовою характеристикою досліджуваного сигналу і за відсутності апріорної інформації про параметри моделі сигналу УНК.

**Постановка завдання.** Аналізований сигнал на часі спостереження  $t \in [0, T_c]$  уявляє адитивну суміш корисного сигналу у вигляді періодичної з періодом  $T_{\Pi}$  послідовності радіоімпульсів і гауссового шуму  $\xi(t)$  з дисперсією  $\sigma^2$  і нульовим математичним сподіванням

$$u_c(t) = U(t) \sin(2\pi f(t - \tau_3)) + \xi(t), \quad t \in [0, T_c], \quad (1)$$

де  $U(t)$  – обвідна сигналу;  $f$  – невідома частота сигналу-носія,  $T_c \gg f^{-1}$ ;  $\tau_3$  – затримка радіоімпульсів відносно початку спостереження.



Сигнал (1) представлений вибіркою  $\{u[j], j = \overline{1, N}\}$ , де  $N$  – обсяг вибірки в дискретні моменти часу  $jT_d$ , де діапазон  $j = 1, [T_c/T_d]$ ,  $T_d$  – період дискретизації.

Відношення сигнал/шум (с/ш) визначається як  $U/\sigma$ .

Необхідно запропонувати спосіб виявлення корисних сигналів в суміші (1) за результатами статистичного аналізу їх фазової характеристики та за невідомої частоти сигналу та відношення сигнал/шум близькому до одиниці.

**Розв’язання поставленого завдання.** Ідея запропонованого варіанту розв’язання сформульованого завдання ґрунтується на відмінності кругової дисперсії  $V$ , визначеної за фазовими характеристиками шумової складової, та її суміші з радіоімпульсом, що містить сигнал-носії певної частоти. З практичної точки зору зручніше використовувати іншу, лінійно зв’язану з  $V$  статистику – результуючої довжини вектора  $r = 1 - V$  [9].

Виявлення корисного сигналу в суміші (1) відбувається за результатами аналізу статистики  $r$ , що обчислюється у ковзному режимі для поточних значень різниці дискретної фазової характеристики сигналу (ДФХС) (1) і лінійного тренду фазової характеристики шуму  $u_m(t)$ . З цією метою виконується дискретне перетворення Гільберта сигналу і визначається його гільберт-образ  $\hat{u}[j] = H_d[u[j]]$ , де  $H_d$  – оператор дискретного перетворення Гільберта [11]. Дробова (тобто в межах напівінтервалу  $[0, 2\pi)$ ) частина дискретної фазової характеристики сигналу (ДФХС) визначається як

$$\phi[j] = \arctg \frac{\hat{u}[j]}{u[j]} + \frac{\pi}{2} \{2 - \text{sign}(\hat{u}[j])(1 + (u[j]))\}, \quad (2)$$

де  $\text{sign}(\cdot)$  – знакова функція. Розгорнута (за межі напівінтервалу  $[0, 2\pi)$ ) ДФХС визначається за допомогою оператора  $L$  розгортання фазової характеристики сигналу [9]:  $\Phi[j] = L(\phi[j])$ .

Попередні дослідження показали, що фазова характеристика реалізації  $u_m(t)$ ;  $\Phi_m[j] = L(\phi_m[j])$ , має лінійний тренд  $\Phi_m^T[j] \approx 0,985j$  рад, що визначається з середньоквадратичним відхиленням  $\sigma_r[j] > 0,004j$  рад. Необхідна для отримання статистики  $r$  вибірки фазових даних визначається як різниця ДФХС  $\Phi[j]$  і лінійного тренду фазової характеристики шуму

$$\Delta\phi[j] = \Phi[j] - \Phi_m^T[j], \quad j = \overline{1, N}, \quad N = T_A/T_d. \quad (3)$$

Обчислення статистики  $r$  відбувається під час руху прямокутного вікна з апертурою  $M_w$  відносно множини (3). На  $j$ -тому кроці сканування ковзне вікно забезпечує відбір частини значень  $\Delta\phi[j]$  і визначення поточного значення статистики  $r$  у відповідності до виразу

$$r[j, M_w] = \frac{1}{M_w} \times \sqrt{\left( \sum_{k=j-M_w/2}^{j+M_w/2} \cos \Delta\phi[k] \right)^2 + \left( \sum_{k=j-M_w/2}^{j+M_w/2} \sin \Delta\phi[k] \right)^2}, \quad j = \frac{M_w}{2}, N - \frac{M_w}{2}. \quad (4)$$

Ознакою наявності корисної складової сигналу є перевищення статистикою  $V[j, M_w] = 1 - r[j, M_w]$  певного порогу  $\Pi \in (0, 1) \Pi$ .

**Результати моделювання.** На етапі підготовки даних виконувалось:

- формування вибірки аналізованого сигналу  $\{u[j], j = \overline{1, N}\}$  з параметрами:  $U = 1$  В,  $f = 5$  МГц,  $T_d = 1,56 \cdot 10^{-9}$  с, відношення сигнал/шум  $\eta = 1$ , кількість періодів сигналу-носія в одному радіоімпульсі  $N_s = 5$ , обсяг вибірки  $N_\Sigma = 19200$ , кількість відліків на період сигналу-носія  $N_1 = 128$ , період надходження радіоімпульсів  $T_\Pi = 6000 T_d = 9,36 \cdot 10^{-6}$  с; сформована вибірка сигналу зображена на рис. 1.

- визначення гільберт-образу сигналу  $\hat{u}[j]$ ;
- обчислення вибірки значень ДФХС  $\phi[j]$  (2) і різниці  $\Delta\phi[j]$  (3) (рис. 2);

- обчислення в ковзному режимі кругової дисперсії  $V[j, M_w] = 1 - r[j, M_w]$ .

Введення цього коефіцієнта приводить до трансформації діапазону представлення різниць фазових зсувів і, як наслідок, до зменшення розкиду фазових даних в апертурі вікна  $M_w$ . Цей коефіцієнт доцільно обирати виходячи з наступних умов:

- діапазон зміни фазових даних в апертурі вікна на ділянках шуму повинен бути значно меншим інтервалу  $(0; 2\pi)$ ;

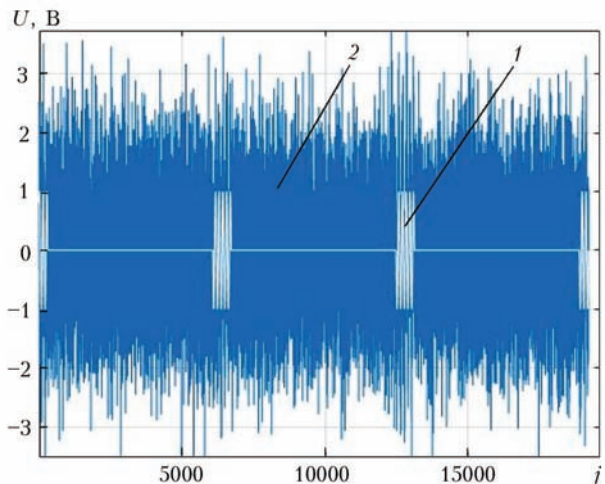


Рис. 1. Реалізація адитивної суміші сигналу (1) та гаусового шуму (2)

– діапазон зміни фазових даних в апертурі вікна на ділянках з радіоімпульсним сигналом повинен покривати інтервал  $(0; 2\pi)$ ;

Як приклад на рис. 3 представлена кругова дисперсія  $V[j]$ , визначена за змодельованою вибіркою  $\Delta\phi[j]$ , до використання коефіцієнта  $K$  (а) і після застосування коефіцієнта ( $\delta$ ) для значень  $K = 50$ ,  $M_W = 50$ .

З наведеного графіка видно, що на ділянках без радіоімпульсного сигналу кругова дисперсія  $V_{\text{ш}}[j, M_W]$  близька до 0, а на ділянках з сигналом

$V_c[j, M_W] \gg V_{\text{ш}}[j, M_W]$ . Ця ознака дозволяє за аналізом кругової дисперсії виявити радіоімпульсні сигнали з гармонічним сигналом-носієм невідомої частоти та оцінити його часове положення.

Виконані дослідження засвідчили, що розмір апертури вікна та коефіцієнт  $K$  суттєво впливають на кругову дисперсію  $V_c[j, M_W]$  та  $V_{\text{ш}}[j, M_W]$  і на можливість виявлення сигналів. Вірогідність виявлення сигналів залежить від різниці значень кругової дисперсії за наявності і відсутності радіоімпульсного сигналу.

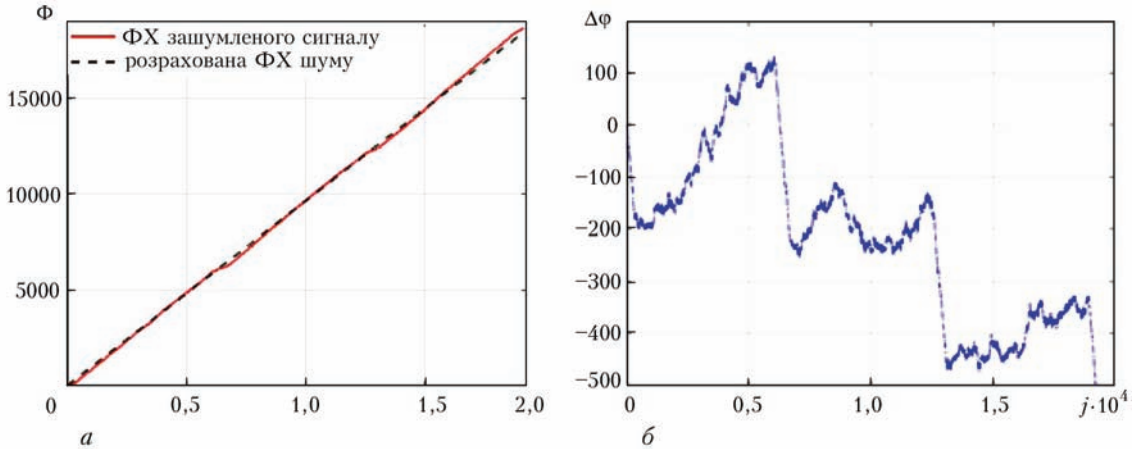


Рис. 2. Графіки характеристик  $\Phi[j]$  та  $\Phi_{\text{ш}}^1[j]$  (а) та різниця фазових характеристик  $\Delta\phi[j]$  (б)

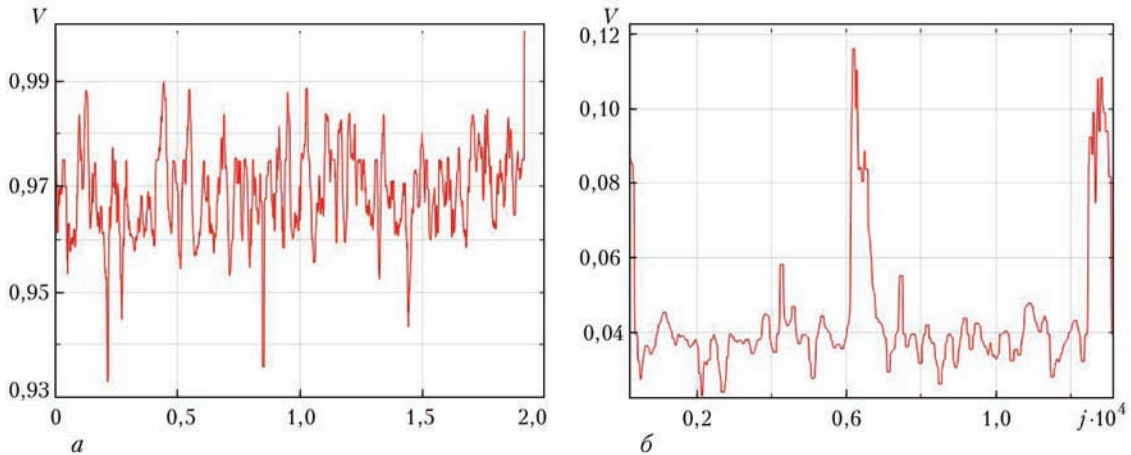


Рис. 3. Графік кругової дисперсії сигналу до (а) і після введення коефіцієнта  $K$  (б)

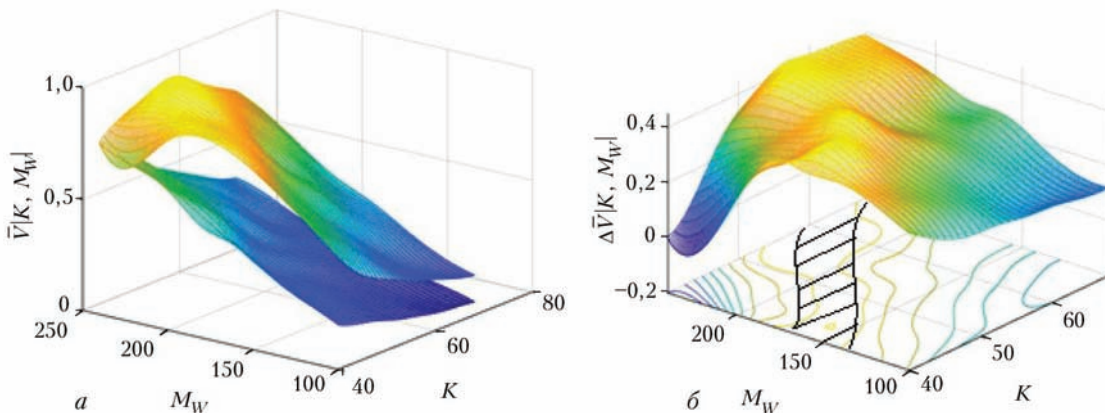


Рис. 4. Залежність середніх значень кругової дисперсії на ділянках без сигналу та з сигналом (а) та різниці середніх рівнів кругової дисперсії (б) від  $K$  та  $M_W$

Для визначення впливу  $K$  та  $M_w$  на кругові дисперсії було виконано додаткові модельні експерименти, які полягали в оцінці функцій:  $\bar{V}_c[K, M_w], \bar{V}_ш[K, M_w]$  та  $\Delta V = \bar{V}_c[K, M_w] - \bar{V}_ш[K, M_w]$ , де  $\bar{V}_ш, \bar{V}_c$  – усереднені значення кругової дисперсії на ділянках відповідно з та без сигналу.

Діапазон варіації змінних обрано наступним чином:  $K \in (40; 70), M_w \in (100; 250)$ . Результат моделювання подано на рис. 4.

З аналізу наведених графіків видно, що значення  $K$  та  $M_w$  необхідно обирати узгоджено: існує певна область їх значень (на рис. 4, б це заштрихована ділянка на площині  $M_w, K$ ), для якої досягається збільшення значення  $\Delta V[K, M_w]$ , що полегшує вибір бракувального рівня та збільшує вірогідність виявлення радіоімпульсних сигналів з апіорно невідомою частотою сигналу-носія.

### Висновки

Досліджено можливості розв’язання завдання виявлення і оцінювання часового положення сигналів УНК, які спостерігаються на фоні шуму, через аналіз кругових статистик, що визначені за фазовою характеристикою сигналу в умовах неповної апіорної визначеності моделі сигналу. Реалізація методу, на відміну від відомих, не потребує копії сигналу чи знання її параметрів. Загальна умова висувається лише до форми сигналу: він має існувати як радіоімпульс з певною обвідною та частотою сигналу-носія, що являє собою циклічний сигнал.

Показано, що статистичні відмінності фазових характеристик реалізацій шуму та його суміші з сигналом дозволяють за результатами статистичного аналізу фазових характеристик останніх виявити радіоімпульсні сигнали і оцінити їх часове положення. Метод дещо програє традиційним методам виявлення сигналів на фоні шуму, що пояснюється відсутністю копії сигналу. Проте ця особливість розширює область його застосування на значне коло завдань, для яких існують мінімальні відомості про досліджувані сигнали. Метод дозволяє вирішувати завдання виявлення радіосигналів за відношення сигнал/шум близького до одиниці.

Достовірність отриманих даних підтверджена результатами комп’ютерного моделювання. Розглянутий спосіб виявлення сигналів може бути використаний у доплерівських ультразвукових приладах контролю для технічного і медичного застосування, в інших діагностичних системах, що працюють в динамічних режимах за значної зміни параметрів сигналів.

### Список літератури

1. (2014) *Справочник по радиолокации*. Сколник М. И. (ред.). Пер. с англ. под об. ред. Вербы В. С. В 2 книгах. Книга 2. Москва, Техносфера.

2. Маевський С. М., Бабак В. П., Щербак Л. М. (1993) *Основи побудови систем аналізу сигналів у неруйнівному контролі*. Київ, Либідь.
3. Качанов В. К., Мозговий О. В., Пітолін О. І. та ін. (1994) *Сучасні методи та засоби ультразвукового контролю з використанням статистичної обробки сигналів*. Навч. посібник. Бабак В. П. (ред.). Київ, ІСДО.
4. Марченко Б. Г., Приймак М. В., Щербак Л. М. (2001) *Теоретичні основи аналізу стохастичних сигналів і шумів*. Навчальний посібник. Тернопіль, ТДТУ імені Івана Пулюя.
5. Качанов В. К., Соколов І. В. (2007) Особенности применения сложномодулированных сигналов в ультразвуковой дефектоскопии. *Дефектоскопия*, **12**, 18–42.
6. Карпаш О. М., Рибіцький І. В., Карпаш М. О. (2008) Обґрунтування можливості використання кодів Баркера для підвищення чутливості ультразвукового безконтактного способу вимірювання товщини. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **2**, 31–35.
7. Соколов І. В. (2007) Сплит-способ ультразвукового контроля. *Дефектоскопия*, **12**, 3–17.
8. Тютякин А. В. (2012) О применении вейвлет-преобразования в спектральном анализе информативных сигналов систем неразрушающего контроля и диагностики. *Контроль. Диагностика*, **8**, 11–16.
9. Куц Ю. В., Щербак Л. М. (2009) *Статична фазометрія*. Тернопіль, Вид-во Тернопільського технічного ун-ту імені Івана Пулюя.
10. Близнюк О. Д., Єременко В. С., Куц Ю. В. та ін. (2009) Застосування методу статистичної фазометрії в ультразвуковому неруйнівному контролі. Зб. наук. праць «*Неруйнівний контроль матеріалів і конструкцій*». Серія: Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. Львів, ФІІ ім. Г. В. Карпенка, 14, сс. 50–55.
11. Лайонс Р. (2007) *Цифровая обработка сигналов*. Второе издание. Пер. с англ. Москва, ООО «Бином-Пресс».

### References

1. (2014) *Reference book on radiolocation*. Ed. by M.I. Skolnik. In: 2 books. Book 2. Moscow, Tecnosfera [in Russian].
2. Maevskii, S.M., Babak, V.P., Shcherbak, L.M. (1993) *Fundamentals of construction of signal analysis systems in nondestructive testing*. Kyiv, Lybid [in Ukrainian].
3. Kachanov, V.K., Mozgovyi, O.V., Pitolin, O.I. et al. (1994) *Modern methods and means of ultrasonic testing with application of statistic processing of signals: Manual*. Ed. by V.P. Babak. Kyiv, ISDO [in Ukrainian].
4. Marchenko, B.G., Pryjmak, M.V., Shcherbak, L.M. (2001) *Theoretical fundamentals of analysis of stochastic signals and noises: Manual*. Ternopil, I. Puliya TDTU [in Ukrainian].
5. Kachanov, V.K., Sokolov, I.V. (2007) Features of application of complex modulated signals in ultrasonic flaw detection. *Defektoskopiya*, **12**, 18-42 [in Russian].
6. Karpash, O.M., Rybytsky, I.V., Karpash M.O. (2008) Substantiation of the possibility of Barker code application for improvement of the sensitivity of ultrasonic contactless method for thickness measurement. *Tekh. Diagnost. i Nerazruch. Kontrol*, **2**, 31-35 [in Ukrainian].
7. Sokolov, I.V. (2007) Split method of ultrasonic testing. *Defektoskopiya*, **12**, 3-17 [in Russian].
8. Tyutyakin, A.V. (2012) On application of wavelet-transformation in spectral analysis of informative signals in the systems of nondestructive testing and diagnostics. *Kontrol. Diagnostika*, **8**, 11-16 [in Russian].
9. Kuts, Yu.V., Shcherbak, L.M. (2009) *Static phasometry*. Ternopil, Vyd-vo I. Puliya TDTU [in Ukrainian].
10. Blyznyuk, O.D., Eremenko, V.S., Kuts, Yu.V. et al. (2009) *Application of the method of statistic phasometry in ultrasonic nondestructive testing*. In: *Nondestructive testing of materials and structures: Transact. Series: Physical methods and means of control of media, materials and products*. Lviv, G.V. Karpenka PMI, 14, 50-55 [in Ukrainian].
11. Lyons, R. (2007) *Digital signal processing. 2nd Ed*. Moscow, Binom-Press [in Russian].

Ю. В. КУЦ<sup>1</sup>, Ю. Ю. ЛЫСЕНКО<sup>1</sup>, М. А. РЕДЬКА<sup>1</sup>,  
Е. Д. БЛИЗНЮК<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НТУУ «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского». 03056, г. Киев, просп. Победы, 37. E-mail: j.lysenko@kpi.ua

<sup>2</sup>Национальный авиационный университет. 03058, г. Киев, просп. Космонавта Комарова, 1

ПРИМЕНЕНИЕ КРУГОВЫХ СТАТИСТИК ДЛЯ  
ОБНАРУЖЕНИЯ СИГНАЛА УЛЬТРАЗВУКОВОГО  
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Рассмотрен метод обнаружения сигналов ультразвукового неразрушающего контроля на фоне аддитивного гауссового шума. Метод основан на анализе круговой дисперсии, которая определяется фазовой характеристикой исследуемого сигнала, и не требует априорной информации о параметрах модели сигнала ультразвукового неразрушающего контроля. Приведены результаты моделирования процесса обнаружения сигналов ультразвукового неразрушающего контроля на фоне шума. Библиогр. 11, рис. 4.

*Ключевые слова:* круговые статистики, круговая дисперсия, обнаружение сигналов в шумах, ультразвуковой неразрушающий контроль

APPLICATION OF CIRCULAR STATISTICS FOR  
DETECTION OF SIGNALS OF ULTRASONIC  
NONDESTRUCTIVE TESTING

Yu.V.KUTS<sup>1</sup>, Yu.Yu.LYSENKO<sup>1</sup>, M.O.RED'KA<sup>1</sup>,  
O.D.BLIZNYUK<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Igor Sikorskii NTUU «Kyiv Polytechnic Institute», 37, Peremogi Ave., 03056, Kyiv. E-mail: j.lysenko@kpi.ua  
<sup>2</sup>National Aviation University, 1 Kosmonaut Komarov Prop., 03058, Kyiv

The paper deals with the method for detection of signals of ultrasonic nondestructive testing against the background of Gaussian noise. The method is based on analysis of circular dispersion, which is determined by phase characteristic of the studied signal, and does not require a priori information on the parameters of the model of ultrasonic nondestructive testing signal. Results of modeling the process of detection of signals of ultrasonic nondestructive testing against the noise background are given. 11 References, 4 Figures.

*Keywords:* circular statistics, circular dispersion, signal detection in noise, ultrasonic nondestructive testing

Надійшла до редакції  
02.03.2018

ПРЕМИЯ им. АКАДЕМИКА НАН Украины И. К. ПОХОДНИ

Ежегодно, с целью выделения ученых, опубликовавших лучшие научные работы, создавших изобретения и открытия, имеющие важное значение для развития науки и экономики, Национальная академия наук Украины присуждает премии имени выдающихся ученых.

В 2017 г., в частности, был объявлен конкурс на премии имени Н. Н. Боголюбова (отделение математики НАН Украины), Д. В. Волкова (отделение ядерной физики и энергетики НАН Украины), С. М. Гершензона (отделение биохимии, физиологии и молекулярной биологии НАН Украины), И. К. Походни (отделение физико-механических проблем материаловедения) и других известных ученых.

Ученый совет ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины рассмотрел представление и постановил выдвинуть на соискание премии им. академика НАН Украины И. К. Походни за 2017 г. цикл работ под названием «Высокоэффективные сварочные материалы с улучшенными санитарно-гигиеническими показателями для сварки современных высокопрочных низколегированных сталей», выполненный сотрудниками отдела «Исследование физико-химических процессов в сварочной дуге» Института д.т.н. В. В. Головки, к. т. н. И. Р. Явдоциным, д.т.н. В. Н. Шлепаковым. Представление было поддержано отделением физико-технических проблем материаловедения НАН Украины и на заседании президиума НАН Украины от 14.02.2018 г. было принято решение о присуждении этой работе премии имени академика НАН Украины И. К. Походни. Премия была вручена первым вице-президентом НАН Украины академиком А. Г. Наумовцем на общем собрании НАН Украины 26 апреля 2018 г.



В. В. Головки



И. Р. Явдошин



В. Н. Шлепаков

Сотрудники Института электросварки им. Е. О. Патона сердечно поздравляют  
**В. В. Головки, И. Р. Явдошина и В. Н. Шлепакова**  
с признанием их заслуг и желают дальнейших творческих успехов.

# ОБЪЕКТИВНЫЙ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЙ ВИЗУАЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ ПРОТЯЖЕННЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ

В. А. ТРОИЦКИЙ

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

Предлагается располагать средства для визуально-измерительного контроля: видеокамеры, лазерные измерители ширины, расстояний, формы шва, электронные средства записи и передачи цифровых изображений, на подвижных магнитных платформах, перемещаемых по поверхности металлоконструкций. Подобные подвижные средства могут быть использованы и для измерений локальных напряженных состояний. Приведены примеры таких подвижных визуально-измерительных устройств. Библиогр. 16, рис. 7.

*Ключевые слова:* лазер; магнитный, механизированный, визуальный, ультразвуковой, рентгеновский контроль; надежность; протяженные металлоконструкции; сварные швы; запись; опасные зоны; деформации; локальное напряженное состояние

Металлоконструкции резервуаров, мостовых переходов, доменных объектов, магистральных трубопроводов и тому подобных ответственных объектов, находящихся в длительной эксплуатации, нуждаются в периодическом точном, документируемом визуально-измерительном контроле (ВИК). Развитие оптической, лазерной, светодиодной, компьютерной техники позволяет поднять уровень качества и объективности получения точной информации о внешних дефектах и опасных зонах с локальными напряжениями. Чем точнее ВИК и чем чаще он выполняется, тем меньше вероятность неожиданных разрушений старых протяженных металлоконструкций сложной геометрии, тем успешнее будут применены методы неразрушающего контроля (НК), следующие за ВИК.

В США [1], Японии [2], России и Украине [3, 4] высоко оценили возможности подвижных сканирующих намагничивающих устройств (НУ) [5–9], позволяющих с большой скоростью выполнять магнитный контроль, находить поверхностные и подповерхностные трещины, скопления пор и т.п. Эти НУ сейчас применяются для контроля хребтовых балок пассажирских вагонов (Украина), ферм подъемных кранов (США). Высокая маневренность и устойчивость этих НУ показала их эффективность при изготовлении арматуры, отводов для магистральных трубопроводов, боковин литых тележек подвижного состава железной дороги (Украина).

С использованием этих сканирующих НУ магнитопорошковый метод на порядок повысил производительность и точность, обеспечил выявление подповерхностных трещин на глубине до 5 мм.

Покажем, как использовать эти устройства для повышения объективности ВИК протяжен-

ных швов и возможности обнаружить деформации и проблемные зоны. Благодаря большим дискообразным магнитным полюсам эти НУ [1–5], свободно перемещаемые вдоль протяженных металлоконструкций, легко преодолевают болты, кромки, ремонтные неровности и тому подобные препятствия. На основе таких подвижных магнитных платформ могут быть созданы и эффективные средства визуального контроля.

На рис. 1 приведено одно из простейших устройств, оборудованное осветителем, камерой наблюдения, монитором, устройством цифровой обработки изображений, беспроводной связью передачи информации (WiFi). Подобные магнитные платформы со временем будут применяться для организации точного, документируемого мониторинга всех современных металлоконструкций.

В литературе [1–5] приведено много подвижных НУ, изготавливаемых под определенные типы металлоконструкций, каждое из которых может быть платформой, инструментом для ВИК, если его оборудовать соответствующими измерительными средствами. Важной особенностью этих подвижных магнитных платформ является их устойчивость во всех пространственных положениях и обеспечение заданных расстояний оптических средств ВИК от изучаемой поверхности, что важно для измерений. ВИК – это основной вид неразрушающего контроля сооружений и металлоконструкций, применяемый на протяжении всей их жизни.

Визуально-измерительный контроль присутствует в начале, при рождении металлоизделий, по его завершении и при эксплуатации металлоконструкций. ВИК – основа безопасности металлоконструкции во всех отраслях промышленности. Поэтому создание механизированных точных

средств ВИК, обеспечивающих повторяемость и сравнение результатов, является актуальной задачей для всех ответственных сооружений.

Компьютеризация, сбор, архивирование и анализ результатов ВИК металлоконструкций только начинает развиваться. Ведущие компании, поставляющие дефектоскопическое оборудование [10–12], показывают много различных систем записи качества поверхности объектов с видеокамерами. Это информационные системы наблюдения с небольшим содержанием измерительных функций, которых может быть намного больше.

Приводимые [12] многими фирмами подвижные устройства ВИК в основном информационные и не являются измерительными. Они находят и передают информацию о наличии поверхностных дефектов.

Сегодня процедуры тщательного ВИК ответственных объектов связаны с монотонностью однотипных действий, что приводит к пропускам и ошибкам. Достоверность ВИК в значительной степени зависит от человеческого фактора, добросовестности, внимательности, влияния внешних воздействий, утомляемости. Все эти негативные обстоятельства усиливаются с масштабами сооружений, объемами ВИК. Особенно изнурительны процедуры ВИК при обследовании днищ резервуаров, ферм мостов и тому подобных больших сооружений.

В отраслях промышленности, связанных с движением, в авиации, на железнодорожном транспорте широко внедряются насыщенные средствами ВИК комплексы для осуществления измерений элементов всей инфраструктуры. Это касается

рельсов, геометрических параметров железнодорожного полотна, сканирования приближения строений, платформ, контактной сети и пр. При этом реализуется техника как для скоростного, автоматического, так и для ручного ВИК. Окончательные решения обычно принимаются по результатам ручного ВИК, как более достоверного, включающего постоянно накапливающийся личный опыт. Автоматические средства работают с высокой скоростью, производительностью, а ручные средства дают точность и обеспечивают правильность принятия окончательного решения. Сочетание скоростного автоматического и ручного НК широко применяется при диагностике и магистральных газопроводов, в основе которой лежит внутритрубный скоростной и внешний – ручной окончательный контроль перед ремонтом.

Для ответственных объектов уже сегодня имеются все предпосылки для начала внедрения механизированного оптико-измерительного контроля на основе устройств, показанных на рис. 1, 2, 3 и различных навесных измерительных, оптических средств, набор которых определяет Заказчик оборудования.

На схеме рис. 3 штриховыми линиями показаны оси лучей лазерных указателей для измерения линейных размеров элементов конструкций и их дефектов, к которым в процессе обследования приближается устройство ВИК/ТВА.

Для многочисленных протяженных металлоконструкций ВИК еще долгие годы будет оставаться основным, а подчас единственным, методом НК. Внешние отклонения от нормы размеров сварных швов и других элементов конструкций, обнаруживаемых ВИК, часто являются признаком наличия повышенных внутренних локальных напряжений, несплошностей, трещин и тому подобного. Поэтому совершенствование качества ВИК, увеличение его точности и производительности, строгости отчетности так важны для ответственных объемных металлоконструкций. Мосты, металлургические, строительные объекты, корабли, газовые магистрали, резервуары нуждаются в архивируемых результатах ВИК.

Оборудованные монитором, видеокамерами, лазерными указателями устройства, показанные на рис. 1, 2, 3, записывают и передают по интернету информацию по проблемным зонам, на основании которой принимаются решения о необходимости в НК и последующем ремонте.

На рис. 1 показаны конструктивная схема и внешний вид легко перемещаемого по поверхности устройства с монитором, имеющим размеры 12×10,5 см, созданного на основе электронного микроскопа (Х600) с регулируемой яркостью восьми светодиодов. Это фактически подвижный цифровой микроскоп, который с литиевым аккумулятором может непрерывно

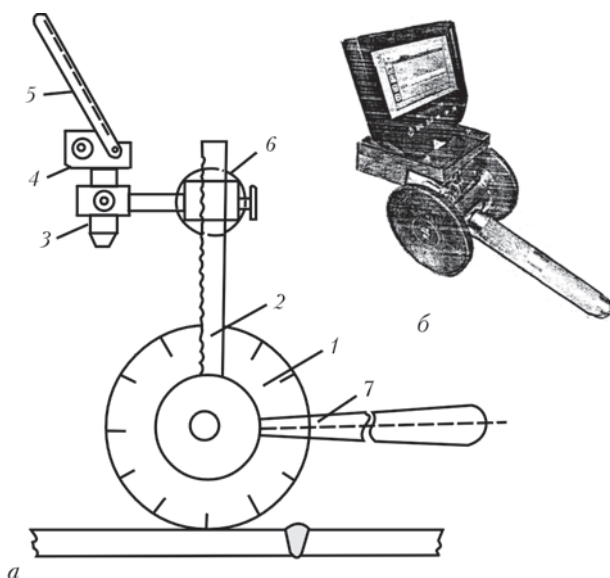


Рис. 1. Конструктивная схема (а) и внешний вид (б) подвижного НУ типа ТВА-2, оборудованного средствами ВИК: 1 – дискообразный магнитный полюс, измеритель пути; 2 – кронштейн для вертикального перемещения видеокамеры 3, блока записи и передачи информации 4, монитора 5; 6 – регулятор расстояния видеокамеры от поверхности; 7 – ручка для перемещения устройства ВИК/ТВА

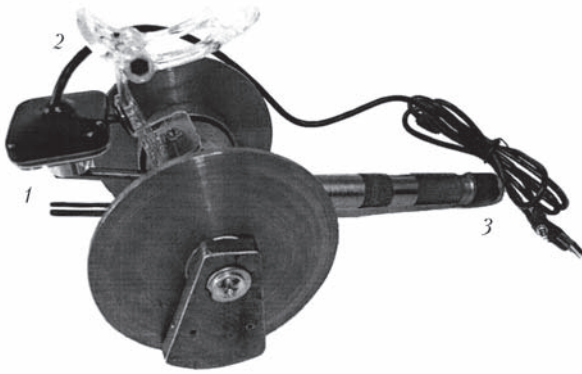


Рис. 2. Устройство ТВА-11 с видеокамерой (1) креплением лазерных измерителей (2), кабелем с универсальными разъемами (3)

работать в течение шести часов. В верхнем поисковом положении он обеспечивает двукратное, а в нижнем – до шестисоткратного увеличения записываемого изображения. Разрешение 1080×720P, VGA, синхронизированная запись с началом движения. Имеется много сервисных программных услуг. Такое устройство выполняет запись всего пути, фотографирование проблемных мест с одновременным комментированием (записывается голос оператора), то есть анализируется на месте изображение, наблюдаемое на мобильном мониторе. Этот комментарий помогает сделать правильные выводы при написании протокола ВИК. Стоимость этих электронных средств (рис. 1) невелика.

Таким образом, теперь ВИК из сугубо субъективного процесса, зависящего от состояния и добросовестности оператора, превращается в объективный вид НК, мало зависящий от оператора. Записи изображений сварных швов, выполненных с помощью регистраторов ВИК/ТВА, в стационарных условиях обрабатываются с помощью цифро-

вых программ анализа изображений с выделением зон, подлежащих ультразвуковому, магнитному, радиационному или какому-либо другому контролю, ремонту и повторному контролю. На рис. 2 показано устройство ВИК/ТВА с одной видеокамерой без монитора, с креплением для лазерных измерителей ширины сварного шва. Примененная здесь USB Веб-камера CW834M низкой стоимости имеет интерфейс USB 2.0, 4 линзы, ручной фокус, микрофон: фото до 2560×2048, видео 30 кадров/с – VGA и пр. Информация от устройства выводится на монитор компьютера.

На рис. 3 показана комплектация магнитной платформы ТВА двумя лазерными указателями ширины шва с подсветкой зон сплавления, по которым обычно разрушаются сварные швы.

На рис. 4 показан пример записи изображения сварного шва, выполненного с помощью ВИК/ТВА в поисковом режиме и зоны с предполагаемыми дефектами в оценочном режиме (четырёхкратное увеличение). Выделенная зона предположительно имеет кратерные и внутренние трещины, размеры и расположение которых могут быть уточнены, например, с помощью магнитопорошкового контроля (МПК). Для выполнения МПК может быть использовано это же намагничивающее устройство, на котором смонтирована компьютерная система ВИК. Таким образом, устройства по рис. 1, 2, 3 могут быть использовано как для ВИК с записью информации и комментариями, так и для выполнения МПК или другого магнитного НК, например, с использованием датчиков Холла. После анализа результатов ВИК и МПК было выполнено рентгенографирование образца (рис. 4).

Сегодня описанные электронные возможности с использованием компьютерной обработки информации избыточны. Поэтому были испытаны упрощен-

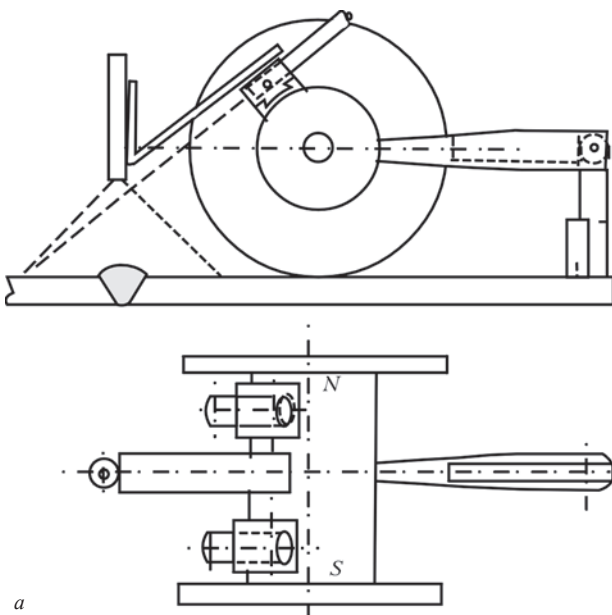


Рис. 3. Конструктивная схема (а) и внешний вид (б) устройства с двумя лазерными указателями и USB Веб-камерой



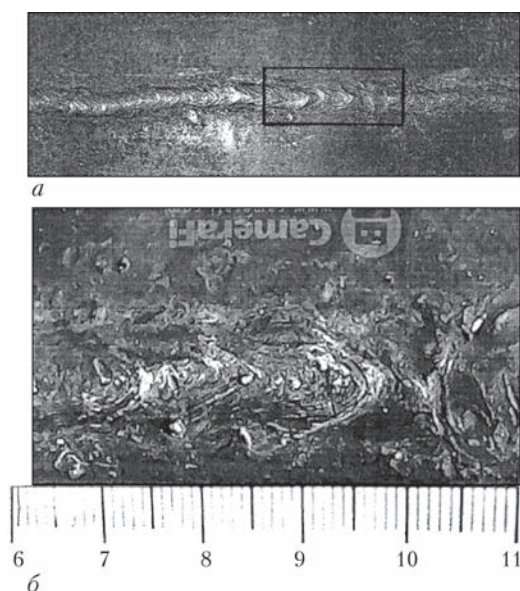


Рис. 4. Пример записи изображения образца сварного шва (а) и его фрагмент (б) зоны возможного расположения внутренних дефектов с тремя поверхностными порами

ные решения на основе смартфонов, например фирмы Samsung, часть которых приведена на рис. 5, 6.

Для дистанционного наблюдения за информацией, потсупающей от подвижного устройства ВИК, используется экран смартфона или планшета.

На рис. 5, 6 показаны простейшие ВИК/ТВА устройства со съемной миниатюрной видеокамерой от эндоскопа (рис. 5), с цветной камерой и использованием обычного смартфона (планшета). С помощью этих простейших решений могут быть обеспечены поисковый и оценочный режимы, запись изображений внешней и внутренней сторон сварного шва, обнаружены опасные изменения формы шва.

Дискообразные магнитные полюса платформ ТВА могут иметь разметку (рис. 1) по образующей и использоваться для измерения расстояний, т. е. они являются одометрами пути. Это не исключает необходимость в лазерных измерителях расстояний и лазерной разметки дефектных зон.

На рис. 5 показано размещение на подвижной платформе типа ТВА видео камер «Camera Fi» USB Inspection для эндоскопа, работающих по программам, заложенным в телефоны типа Samsung Galaxy S4, S5, S6. Это очень мобильная дешевая водонепроницаемая видеокамера, обеспечивающая изображения на компьютере, планшете или телефоне со всеми сервисными функциями (запись, фотографирование, автоматическая настройка резкости, памяти и пр.). При выполнении ВИК в поисковом режиме камера находится на удалении 5...10 см от поверхности, а в оценочном режиме приближается на несколько сантиметров. Это обеспечивает четырех-пятикратное увеличение. Этого вполне достаточно для ВИК. Камера (рис. 5, 6) имеет кабель до 5 м и может быть использована в труднодоступных местах, где не может пройти платформа ТВА.

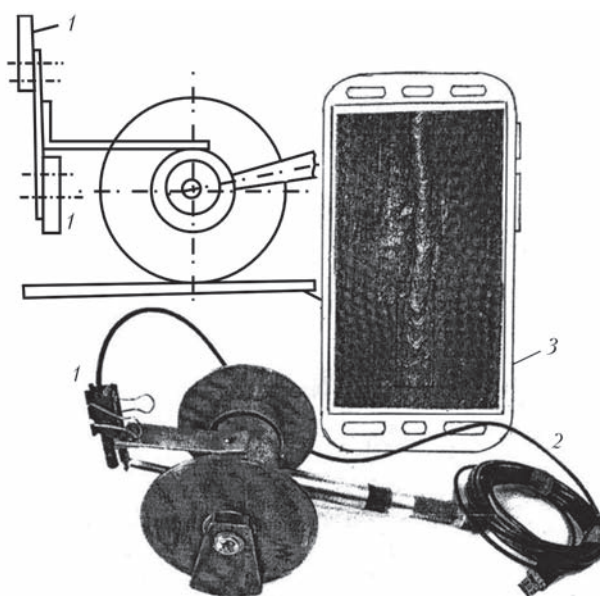


Рис. 5. Устройство ВИК/ТВА с одной и двумя видеокамерами (1), кабелем (2) протяженностью 5 м с разъемом USB для подключения к смартфону (3) или компьютеру

Все приведенные примеры устройств ВИК/ТВА обеспечивают измерение геометрических размеров сварных швов, определение координат опасных зон для дальнейшего изучения или ремонта. Эти зоны могут быть сфотографированы при разных ракурсах и при разных фокальных увеличениях. Для получения большей информации от одного прохода ВИК/ТВА могут использоваться две и более по-разному ориентированные миниатюрные камеры, расположенные по схеме рис. 5, или например, на разных расстояниях от поверхности объекта и под разными углами. Тогда практически совмещаются поисковый и оценочный режимы без остановки ВИК. Применение одно- или двупроходного визуально-измерительного контроля с использованием средств ВИК/ТВА уменьшает влияние человеческого фактора, повышает надежность и экономит время. При этом повышается точность ВИК и объективность информации, возможность ее архивирования, анализа с помощью цифровых компьютерных программ, передачи информации по интернету.

Информационные возможности технологии ВИК/ТВА зависят от характеристик, количества и параметров используемых навесных технических средств. На рис. 5, 6 показаны простейшие устройства со съемными портативными видеокамерами с размерами  $\varnothing 5 \times 4,5 \times 60$  мм, возможностью записи в удаленных и скрытых полостях обследуемой конструкции.

На рис. 6, а-г показаны фотографии объектов визуально-измерительного контроля, полученные с помощью устройства ВИК/ТВА с одной видеокамерой (рис. 2, 3, 5), располагаемого на поверхности конструкций.



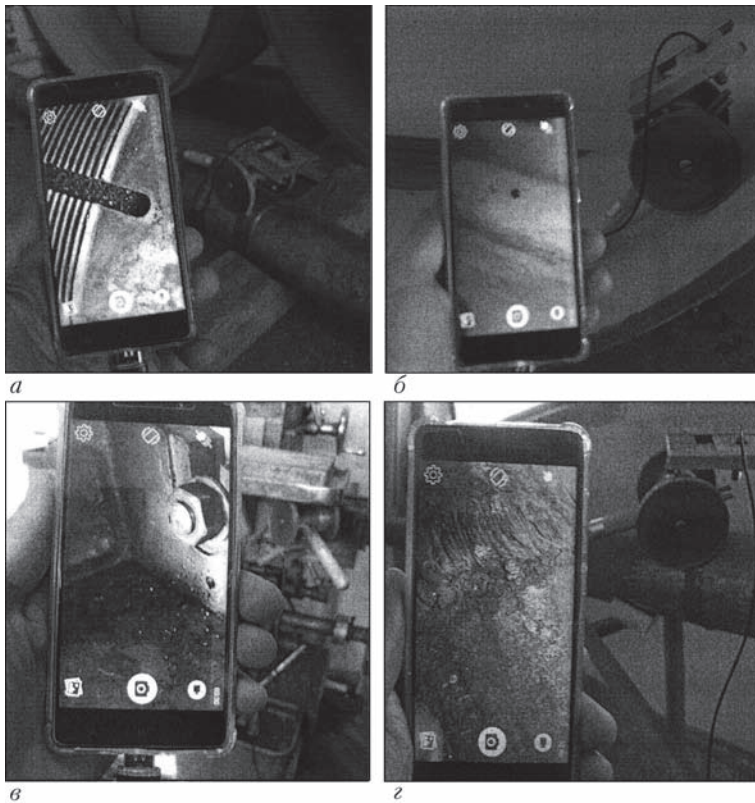


Рис. 6. Фотографии объектов ВИК на экране смартфона Samsung, который держит в руках оператор, и устройства ВИК/ТВА с одной видеокамерой (рис. 5), располагаемого на поверхности: а – протяженного вала турбины: видны резьба и шпоночная канавка; б – внутри обечайки диаметром 1420: видны крупные поры; в – сложной металлоконструкции: видна труднодоступная зона; з – обратная сторона кольцевого монтажного шва трубопровода диаметром 114: видны плохо зачищенные брызги

На всех фотографиях по рис. 6 используется монитор смартфона Samsung, который держит в руках оператор. Для ускорения ВИК удобно подобный монитор крепить на запястье руки оператора, которой он передвигает записывающее устройство ВИК/ТВА.

Кроме визуально-измерительных возможностей существуют варианты комплектации устройств ВИК/ТВА другими измерительными средствами, которые позволяют оценивать напряженное состояние локальных зон. Не в ущерб технологии ВИК намагничивающие устройства ТВА могут быть дооборудованы датчиками, измеряющими внутренние напряжения металлоконструкции, например, зоны, где имеются многочисленные мелкие внутренние дефекты. Пример такого магнито-оптического измерителя напряженного состояния околошовной зоны на базе намагничивающего устройства серии ТВА показан на рис. 7.

Известно, что для записи остаточных напряжений высоко эффективным является магнито-оптический метод [9], применяемый для фиксации слабых магнитных полей на поверхности ферромагнитных объектов. Этот метод может быть применен для оценки напряженного состояния локальных зон протяженных объектов, наличия мелких трещин и т.п.

На рис. 7 показана принципиальная схема магнито-оптического преобразователя в сочетании с намагничивающим устройством ТВА, которое предназначено для оценки качества наиболее слабой околошовной зоны магистральных газопроводов. Этот метод очень чувствителен к мелким дефектам и остаточным внутренним напряжениям и поэтому нашел широкое применение в криминалистике, например, для восстановления зачищенных номеров автомобильных двигателей, стертых номеров огнестрельного оружия. Все элементы схемы на рис. 7 в промышленном исполнении очень миниатюрны и имеют размеры, не превышающие размеров других средств, монтируемых на ТВА для выполнения ВИК.

Использование магнито-оптического метода (рис. 7) для оценки околошовной зоны интересно, например, тогда, когда надо найти в нитке раскрывшегося (взорвавшегося) газопровода полноценную трубу, до которой все нераскрывшиеся, но уставшие трубы должны быть удалены. Это редкая задача, но она, как и проблема уставших артиллерийских стволов, может быть решена только этим методом.

Принцип работы метода следующий.

Намагничивающее устройство создает в объекте магнитный поток, часть которого в зависимости от качества объекта появляется на его поверхности. Если этого нет, то вектор намагниченности пленки 3 лежит в ее плоскости. Над трещинами, уставшими зонами на поверхности объекта появляются магнитные поля рассеяния. Тогда структура

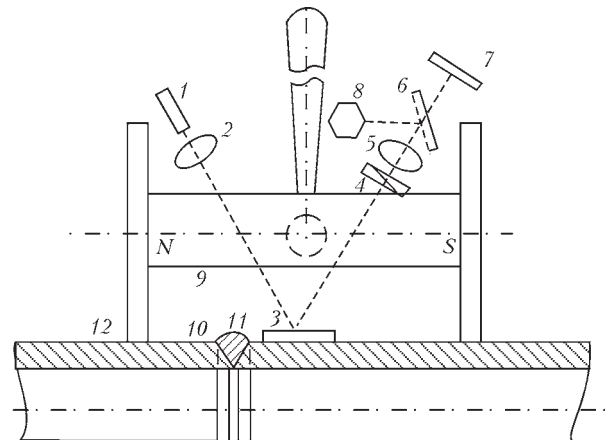


Рис. 7. Схема магнито-оптического устройства на базе НУ 9 типа ТВА, предназначенного для оценки напряженного состояния околошовных зон 10 монтажных 11 и продольных швов газопроводов 12, содержащая: 1 – источник поляризованного света; 2 – формирователь пучка света; 3 – пленка магнито-оптическая; 4 – анализатор; 5 – оптическая система; 6 – зеркало; 7, 8 – фотоприемники

намагниченности пленки 3 совпадает со структурой полей рассеяния. Источник поляризованного света 1 через формирователь пучка света 2 освещает пленку 3. Свет, отраженный от бездефектных участков гасится анализатором 4. Свет, который проходит от дефектных зон, меняет свою поляризацию и не задерживается анализатором 4. После оптики 5 свет, несущий информацию о структуре поверхностных магнитных полей через зеркало 6 попадает на фотоприемники 7 и 8. Далее с помощью компьютерных программ на мониторе изображается образ дефектов по их нормальным составляющим полей рассеяния.

Описанные оптико-механические системы, жестко стоящие на поверхности ферромагнитных металлоконструкций, могут не только передавать по интернету сведения, касающиеся ВИК, но и использоваться в качестве средства для измерения деформаций, линейных размеров отдельных удаленных зон. На подвижной магнитной базе могут быть реализованы параллельно техническому зрению контактные и бесконтактные средства [10] для измерения размеров всего пространства и отдельных элементов, дефектных зон конструкции. В работе [10], посвященной анализу возможностей измерительных функций технических эндоскопов, отмечается, что кроме выше описанных простых оптических задач существуют: высокочувствительные камеры с объективами фокусирования, фотоэлектрические средства для стереоскопической, проекционной, голографической и ультразвуковой дистанционной техники измерения размеров.

Из возможных методов определения размеров деформаций для ординарных задач ВИК металлических сооружений интересен и легко реализуем стереоскопический метод измерений. Стереопара состоит из двух видеокамер. Совокупный диаметр двух таких камер может быть несколько миллиметров с обзором не менее 120°. Такие стереопары объединяют в головку эндоскопа диаметром 4...5 мм. Диаметр телекамеры, примененной в устройстве для ВИК по рис. 5, 6 составляет 4,5 мм. В измерительных оптических приборах стереоскопический эффект получается раздвоением лазерного луча с помощью бипризмы. С целью сокращения влияния человеческого фактора при измерениях в стереоскопических приборах применяются программные алгоритмы, рассчитывающие трехмерные координаты каждой точки видеосенсора в видимом поле зрения. Это позволяет установить реперные точки не в двух видимых ракурсах, а в одном, что сокращает ошибки в медицинской эндоскопии. Такие тонкие измерения в реальном времени могут обеспечить измерения деформаций отдельных узлов металлоконструкций.

Трудно предвидеть, суждено ли оптико-механическим системам ВИК/ТВА, имеющим несколько лазерных указателей (рис. 3), найти применение для

диагностики локальных деформаций протяженных металлоконструкций, но для развития подобных измерений расстояний и линейных размеров имеется практически все необходимое в медицинской эндоскопии. Параллельность лазерных лучей, сведение лазерных точек в одну, разведение их на заданные расстояния при фиксировании углов излучений дают интересные возможности для эксплуатируемых металлоконструкций.

Известно, что металлоконструкции разрушаются от внутренних напряжений, а дефекты, поиску которых посвящен визуально-измерительный контроль, являются их внешними инициаторами. Далеко не все трещины и другие дефекты опасны, если они находятся, например, в условиях сжимающих нагрузок. Однако для всех долго работающих металлоконструкций необходим серьезный ВИК. После ВИК следуют расчеты, измерения напряженного состояния, ремонт, повторный ВИК и так далее.

Измерением напряженного состояния занимаются многие специалисты, имеется на эту тему обширная литература, много технологий и технических средств. Рассмотренные НУ типа ТВА, примененные для магнитного контроля и для ВИК, могут быть успешно использованы для реализации, например [15], метода, условно называемого «магнитной памятью», для оценки напряженного состояния металлоконструкций, не имеющих видимых внешних дефектов типа трещин.

Сущность магнитометрического метода состоит в том, что в процессе периодического нагружения на поверхности ферромагнитного материала появляется магнитное поле. Градиент картины распределения этого усталостного поля указывает на зону предполагаемого разрушения, на зону появления усталостной трещины или большого межкристаллического коррозионного поражения. Этот информационный признак усиливается, если к этой зоне приложено внешнее магнитное поле НУ. Эти усталостные зоны определяются феррозондами, датчиками Холла, магниточувствительными резисторами и т.п. Входя в зону, где металл устал, его структура напряжена, изношена, магнитная платформа усиливает магнитное поле на поверхности, что способствует их выявлению. Поэтому магнитные платформы для ВИК, оборудованные феррозондами, будут находить также трещины и зоны повышенных остаточных напряжений.

### Выводы

1. От совершенства визуально-измерительного контроля (ВИК) в значительной мере зависит продолжительность жизни долго эксплуатируемых ответственных металлоконструкций, правильность определения потенциально опасных зон, расчетов их на прочность, оценка деформации и напряженного состояния.

2. Все технические средства для ВИК критичны к точности поддержания расстояний до изучаемых поверхностей, уровня освещения, правильности измерений линейных размеров, сохранения и анализа точной визуальной информации для сравнения с результатами предыдущих и последующих ВИК. Поэтому подвижная измерительная платформа со средствами ВИК должна жестко поддерживать расстояния до изучаемых поверхностей, обеспечивать повторяемость результатов.

3. Подвижной базой для расположения видеокамер, осветителей, лазерных измерителей и указателей, одометров, мониторов, уровнемеров и других технических средств ВИК могут быть магнитные платформы, легко перемещаемые по поверхности металлоконструкций, например, типа ТВА, которые хорошо зарекомендовали себя при магнитопорошковым контроле элементов трубопроводных магистралей, хребтовых балок, тележек и других частей железнодорожных вагонов, металлоконструкций подъемных механизмов и других объектов.

4. Оборудование подвижных магнитных платформ феррозондами, датчиками Холла, магнито-оптическими преобразователями и тому подобными средствами позволяет совместить визуально-измерительный контроль с оценкой остаточного напряженного состояния протяженных металлоконструкций.

5. Использование нескольких лазерных указателей и дальномеров на платформе ВИК/ТВА является базой для решения тригонометрических задач оценки деформаций и измерений линейных размеров удаленных элементов, не доступных для ручных измерений.

6. ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ помогает заинтересованным организациям изготавливать механико-оптические системы для ВИК и других методов НК с учетом специфики их производства и условий эксплуатации ответственных металлоконструкций.

#### Список литературы

1. Патон Б. Е., Троицкий В. А. (2013) Основные направления работ ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины по совершенствованию неразрушающего контроля сварных соединений. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 4, 13–29.
2. Troitskiy V. A., Es'kov Yu. B., Radko V. P. (1977) Non-destructive testing of Welded structures and constructions in the E. O. Paton Electric Welding Institute. *Insight*, 39, 9, European Issue, September.
3. Troitskiy V. A. (2015) Devices for the movable Local Multidirectional Magnetization of Metal Structures in Magnetic Particle Testing. *Materials Evaluation*, 73, 6, 676–683.
4. Troitskiy V. A. (2015) New Technology for Magnetic Particle Testing. *The NDT Technician. (TNT) ASNT, USA*.
5. Troitskiy V. A. (2015) Multidirectional local Magnetization of Extended Metal Structures. *The Japanese Society Journal for NDT*, 64, 2, 79–85.
6. Трошенко Н. А., ВYLESOV Ю. Ф. (2001) *Способ магнито-оптической дефектоскопии стенок трубопровода*. Украина, Пат. UA 36299A.
7. Троицкий В. А. (2013) *Подвижное намагничивающее устройство для дефектоскопии протяженных конструкций*. Украина, Пат. 82447 от 12.08.2013.

8. Троицкий В. А. (2015) *Рухомий намагнічуючий пристрій*. Україна, Пат. 109218 від 27.07.2015.
9. Троицкий В. А., Левый С. В., Агадиди Ю. С., Посыпайко Ю. Н. Магнитооптическая дефектоскопия изделий и соединений. *Труды конференции НКД-2009*, сс. 63–67.
10. Тарабрин В. Ф., Щеглов Д. М., Кисляковский О. Н. (2017) Инновационное применение визуально-измерительного и оптического контроля железнодорожного транспорта. *В мире НКЮ*, 20, 3, 68–72.
11. Троицкий В. А. (2009) *Визуальный и измерительный контроль деталей машин, металлоконструкций, сварных соединений*. Киев, Феникс.
12. Бобров В. Т., Следнев А. М. (2018) Роботизированные системы неразрушающего контроля и технической диагностики промышленных объектов. *Контроль. Диагностика*, 2, 16–29.
13. Бондарев Ю. О. (2017) Методы и средства совершенствования технических эндоскопов с измерительными функциями. *Там же*, 6, 64–68.
14. Туробов Б. В. (2014) *Визуальный измерительный контроль. Учебное пособие*. В. В. Клюев (ред.). Спектр.
15. Дубов А. А. (2013) Контроль качества изделий машиностроения с использованием магнитной памяти металла. *Территория NDT*, 62–64.
16. Троицкий В. А. (2015) Разнонаправленное намагничивание металлоконструкций при магнитопорошковом контроле. *Там же*, 2, 78–83.

#### References

1. Paton, B.E., Troitskiy, V.A. (2013) Main directions of activity of the E.O.Paton Electric Welding Institute of NASU on improvement of nondestructive testing of welded joints. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 4, 13-19 [in Russian].
2. Troitskiy, V.A., Es'kov, Yu.B., Radko, V.P. (1977) Non-destructive testing of welded structures and constructions in the E.O. Paton Electric Welding Institute. *Insight*, 39, 9, European Issue, September.
3. Troitskiy, V.A. (2015) Devices for the movable local multidirectional magnetization of metal structures in magnetic particle testing. *Materials Evaluation*, 73(6), 676-683.
4. Troitskiy, V.A. (2015) *New technology for magnetic particle testing. The NDT Technician. (TNT) ASNT, USA*.
5. Troitskiy, V.A. (2015) Multidirectional local magnetization of extended metal structures. *The Japanese Society J. for NDT*, 64(2), 79-85.
6. Troshchenko, N.A., Vylesov, Yu.F. (2001) Method of magneto-optic flaw detection of pipeline walls. Pat. 36299A, Ukraine [in Russian].
7. Troitskiy, V.A. (2013) *Mobile magnetization device for flaw detection in extended structures*. Pat. 36299A, Ukraine [in Russian].
8. Troitskiy, V.A. (2013) *Mobile magnetization device*. Pat. 109218, Ukraine, 27.07.2015 [in Ukrainian].
9. Troitskiy, V.A., Levyi, S.V., Agadidi, Yu.S., Posypajko, Yu.N. Magneto-optic flaw detection of products and joints. *In: Proc. of NKTD-2009*, 63-67 [in Russian].
10. Tarabrin, V.F., Shcheglov, D.M., Kislyakovskiy, O.N. (2017) Innovative application of visual measurement and optical control of railway transportation. *V Mire NKYu*, 20(3), 68-72 [in Russian].
11. Troitskiy, V.A. (2009) Visual and measurement control of the parts of machines, metal structures and welded joints. Kiev, Fenix [in Russian].
12. Bobrov, V.T., Slednev, A.M. (2018) Robotic systems of non-destructive testing and technical diagnostics of industrial facilities. *Kontrol. Diagnostika*, 2, 16-29 [in Russian].
13. Bondarev, Yu.O. (2017) *Methods and means of improvement of technical endoscopes with measurement functions*. [in Russian].
14. Turubov, B.V. (2014) *Visual measurement control: Manual*. Ed. by V.V. Klyuev. Spektr [in Russian].
15. Dubov, A.A. (2013) Quality control of the mechanical engineering products with application of magnetic memory of metal. *Territoriya NDT*, 62-64 [in Russian].
16. Troitskiy, V.A. (2015) Magnetization of metal structures in different directions in magnetic powder inspection. *Ibid.*, 2, 78-83 [in Russian].

В. А. ТРОИЦКИЙ

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

ОБЪЕКТИВНЫЙ ТА ПРОДУКТИВНИЙ ВІЗУАЛЬНИЙ  
КОНТРОЛЬ ПРОТЯЖНИХ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ

Пропонується розміщати засоби для візуально-вимірювального контролю: відеокамери, лазерні вимірювачі ширини, відстаней, форми шва, електронні засоби запису та передачі цифрових зображень, Подібні рухомі засоби можуть бути використані і для вимірювання локальних напружених станів. Наведено приклади виготовлення таких рухливих візуально-вимірювальних пристроїв на рухомих магнітних платформах, що переміщуються по поверні металокопструкцій. Бібліогр. 16, рис. 7.

Ключові слова: лазер; магнітний, механізований, візуальний, ультразвуковий, рентгенівський контроль; надійність; протяжні металокопструкції; зварні шви; записування; небезпечні зони; деформації; локальний напружений стан

V.A.TROITSKII

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

OBJECTIVE AND EFFICIENT VISUAL CONTROL OF  
EXTENDED METAL STRUCTURES

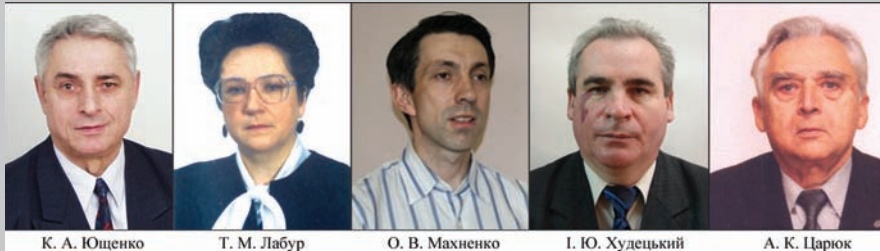
It is proposed to place the means for visual measurement control, namely video cameras, laser meters of the width, distances and shape of welds, electronic means for recording and transmission of digital images on mobile magnetic platforms, moving over the metal structure surface. Such mobile means can be used also for measurement of local stressed states. Examples of such mobile visual measurement devices are also given. 16 References, 7 Figures.

Keywords: laser; magnetic, mechanized, visual inspection, ultrasonic testing, X-ray inspection; control, reliability; extended metal structures, welds; recording, dangerous zones, local stressed state

Поступила в редакцію  
11.05.2018

**ПОЗДОРОВЛЯЄМО ЛАУРЕАТІВ ДЕРЖАВНОЇ ПРЕМІЇ УКРАЇНИ  
В ГАЛУЗІ НАУКИ І ТЕХНІКИ**

Указом Президента України № 138/2018 від 19 травня 2018 р. присуджено Державні премії України в галузі науки і техніки групі вчених, до складу якої увійшли п'ять співробітників ІЕЗ ім. Є. О. Патона: академік НАН України К. А. Ющенко, д-ра техн. наук Т. М. Лабур, О. В. Махненко, д-р мед. наук І. Ю. Худецький, канд. техн. наук А. К. Царюк.



*Бажаємо лауреатам міцного здоров'я і подальших творчих успіхів на благо України.*

*Редколегія журналу*

**УКАЗ ПРЕЗИДЕНТА УКРАЇНИ № 138/2018 (витяг)**

Про присудження Державних премій України в галузі науки і техніки 2017 р.

На підставі подання Комітету з Державних премій України в галузі науки і техніки постановляю:  
присудити Державні премії України в галузі науки і техніки 2017 р.

За роботу «Матеріали і технології сучасної авіаційної техніки»:

ЮЩЕНКО Костянтину Андрійовичу — академікові Національної академії наук України, заступникові директора Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України,

ЛАБУР Тетяні Михайлівні — докторові технічних наук, провідному науковому співробітникові Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України.

За роботу «Ефективні методи оцінювання напруженого стану структурно-неоднорідних тіл, спричиненого дією полів різної фізичної природи»:

МАХНЕНКУ Олегу Володимировичу — докторові технічних наук, завідувачеві відділу Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України.

За роботу «Кріотермохірургічні методи та апаратура для лікування онкологічних захворювань органів черевної порожнини»:

ХУДЕЦЬКОМУ Ігорю Юліановичу — докторові медичних наук, провідному науковому співробітникові Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України.

За роботу «Створення оборотних гідроагрегатів Дністровської ГАЕС для підвищення ефективності об'єднаної енергетичної системи України»:

ЦАРЮКУ Анатолію Корнійовичу — кандидатові технічних наук, завідувачеві відділу Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України.

Президент України  
19 травня 2018 р.

П. Порошенко

# МОНІТОРИНГ ТА РОЗРАХУНОК НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ПІДЗЕМНИХ МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВОДІВ В ЗОНАХ ШАХТНИХ ВИРОБОК

**З. С. ЯСКОВЕЦЬ, І. В. ОРИНЯК**

Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України. 01014, м. Київ, вул. Тимирязевська, 2.  
E-mail: [info@ipp.kiev.ua](mailto:info@ipp.kiev.ua)

В роботі описано систему та результати моніторингу напружень в трубопроводах, що знаходяться в зоні впливу шахтних виробок. Вимірювання деформацій реалізовано за допомогою тензометричних резисторів, зібраних в модифіковану термокомпенсовану напівмостову схему Уїтстона. З метою неперервного моніторингу напівмостова схема доповнена системою автоматизованого зчитування та запису. Місця встановлення систем моніторингу визначались на основі прогнозних розрахунків напруженого стану газопроводів від впливу шахтних виробок. Результати моніторингу підтвердили коректність використаних розрахункових методів. Крім того, зафіксовано процеси навантаження та релаксації напружень в часі. Виявлено, що навантаження підземного газопроводу в процесі відпрацювання шахтної виробки відбувається рівномірно як на ділянках стиску, так і на ділянках розтягу. Після проходження шахтної виробки зафіксовано, що процеси релаксації напружень в газопроводі протікають на різних ділянках нерівномірно. В розтягнутих (віддалених від центру шахтної виробки) зонах газопроводу релаксація протікає значно швидше ніж в стиснутих (в центрі шахтної виробки).

*Ключові слова*: магістральний трубопровід, шахтна виробка, напружений стан, моніторинг, мостова схема Уїтстона

Відпрацювання вугільних пластів призводить до зрушення земної поверхні, яке викликає деформаційні процеси в ґрунті. В свою чергу деформації ґрунту призводять до деформацій об'єктів, які потрапляють в зону шахтної виробки. Для малогабаритних інженерних конструкцій незначної, в порівнянні з зоною впливу виробки, протяжності (опори ліній електропередачі, фундаменти будівель та ін.) деформації і кривизни земної поверхні і відповідних точок конструкцій можуть вважатися рівними. Оскільки методики прогнозування динаміки розвитку деформацій землі є добре відомими [1], то знаючи допустимі деформації конструкції можна прогнозувати можливість і час досягнення критичної ситуації. Проте в окремих випадках наближення до критичних ситуацій необхідні більш точні оцінки, і рекомендується проведення моніторингу просідань, кривизн і переміщень земної поверхні, методи і послідовність проведення яких є вже усталеною інженерною практикою [2].

Для довгомірних конструкцій, якими є трубопроводи, рівні деформацій ґрунту і труби не є тотожними величинами і точки максимальних деформацій труби можуть знаходитися на значній відстані від відповідних точок ґрунту, а самі величини максимумів можуть значно різнитися. Звичайно, розрахункові методи механіки будівельних конструкцій спроможні з великою точністю визначати характер деформування трубопроводу за відомими переміщеннями землі [3]. Проте відомі випадки, коли фактичні переміщення земної по-

верхні значно відрізняються від прогнозних. Методи прогнозування переміщень земної поверхні в результаті відпрацювання шахтних виробок базуються на напівемпіричних підходах, сформованих в 1960–1970-х роках на основі великої кількості спостережень і не завжди точно можуть відобразити реальну картину переміщень поверхні ґрунту. Тому для відображення реальної картини напруженого стану трубопроводів необхідно проводити безпосередній моніторинг під час проходження шахтних виробок [4].

В практиці експлуатації газопроводів в зонах шахтних виробок існує ряд випадків, коли прогнозні значення переміщень поверхні ґрунту добре узгоджувались з результатами інструментальних спостережень, однак рівень прогнозних та реальних напружень значно відрізнялись, що в свою чергу призвело до змін та розгерметизації газопроводів (рис. 1). В першу чергу це пов'язано з недосконалістю обраних методів для оцінки напруженого стану трубопроводів та складністю врахування реально діючої сили взаємодії між поверхнею трубопроводу та ґрунту. По-друге, важливим моментом є оцінка напруженого стану трубопроводів при одночасному та повторному відпрацюванні шахтних лав на суміжних ділянках трубопроводів, оскільки при проведенні окремих розрахунків для суміжних лав не враховуються процеси накопичення та релаксації напружень в часі. Відповідно до діючих норм [5] при повторному відпрацюванні газопроводів релаксація напружень враховується шляхом вве-

дення коефіцієнта пристосування трубопроводу до деформаційних впливів від минулих виробок. Відмітимо, що введений коефіцієнт отримано напівемпіричними методами, що базуються на великому досвіді проведення інструментальних спостережень за деформацією ґрунту, та в свою чергу потребує уточнення по відношенню до реальних процесів релаксації напружень в трубопроводах.

На рис. 1 представлено загальний вигляд зруйнованих ділянок газопроводу Ду 300 в результаті неврахування накопичення напружень від минулих виробок (рис. 1, а) та формування некоректних заходів щодо зниження високого рівня напружень в газопроводі (рис. 1, б), що прямо свідчить про недосконалість обраних методів оцінки напруженого стану трубопроводів.

Очевидно, що найефективнішим методом вирішенням вище зазначених питань є безпосередній моніторинг напруженого стану трубопроводів під час відпрацювання шахтних виробок. З однієї сторони неперервний моніторинг дасть змогу якісно оцінювати результати прогностичних розрахунків напруженого стану трубопроводів та ефективних заходів щодо забезпечення надійної експлуатації в зонах впливу шахтних виробок. З іншої сторони результати неперервного моніторингу дадуть можливість вивчити процеси навантаження та релаксації напружень в трубопроводах під час відпрацювання шахтних виробок.

Прикладом впровадження такої системи моніторингу є робота [6], де спочатку визначаються закони взаємодії між поверхнею трубопроводу та ґрунту відповідно до методики [7] та виконується аналіз напруженого стану з використанням методу скінчених елементів, після чого результати розрахунків порівнюються з результатами моніторингу. Рівень допустимих напружень визначається відповідно до стандарту [8], де навантаження

класифікуються як такі, що викликані випадковими неперіодичними чинниками, а локальні дефекти від зварювання окремих секцій труб аналізуються відповідно до нормативу [9].

Таким чином, моніторинг і розрахунок напруженого стану трубопроводів є взаємодоповнювальними. Інформація про розвиток реальних процесів, що відбуваються в трубопроводі під час його підроблювання шахтними лавами, може сприяти побудові нових більш точних моделей аналізу напруженого стану. Мета даної роботи – створення системи моніторингу, отримання інформації, яка в майбутньому може бути використана для уточнення наших уявлень і моделей.

**Система моніторингу напружено-деформованого стану трубопроводів.** Серед широкого ряду експериментальних методів вимірювання деформацій для більшості задач провідну роль займають вимірювання за допомогою тензометричних резисторів (ТР). Такий вибір зумовлено насамперед розумним співвідношенням вартості та ефективності. Крім того, широкий ряд ТР дає змогу використовувати їх як основу для вирішення задач за різних умов проведення експерименту (наприклад, в зонах високих температур, підвищеної вологості тощо).

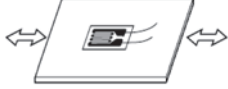
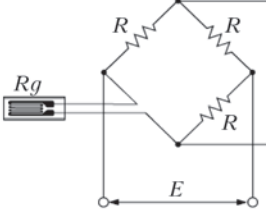
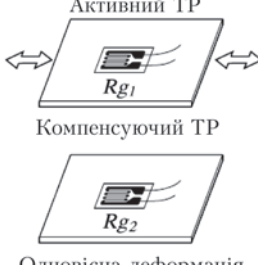
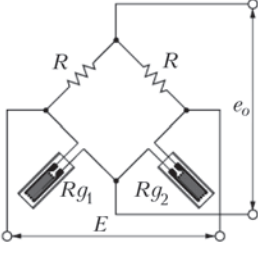
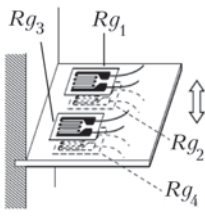
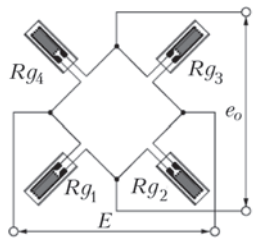
Вимірювання деформацій за допомогою тензорезистивних перетворювачів – одне з найскладніших в техніці електричних вимірювань. Складність полягає в дуже малому діапазоні зміни опору ТЗ від впливу деформації. Наприклад, для 100 Ом ТР зміна опору складає 0,00002 Ом на 1 мкм/м. Для перетворення настільки малих змін опору в вихідні сигнали опору, які можуть бути зафіксовані в вимірювальних приладах, широко використовується мостова схема.

Вимірювальний міст прийнято зображати у вигляді ромба, сторони якого називають плечима, а



Рис. 1. Руйнування трубопроводів в зоні впливу шахтної виробки (опис а і б див. в тексті)

Таблиця 1. Формування тензометричних мостових схем

Номер модифікації	Примітки	Приклад	Схема	Вихід
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>– застосовується при малих змінах температури;</li> <li>– 2-х провідна;</li> <li>– 1 активний ТР;</li> <li>– без термокомпенсації</li> </ul>	 <p>Одноісна деформація (розтяг / стиск)</p>		$e_0 = \frac{E}{4} k \epsilon_0$
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>– активний + термокомпенсійний</li> <li>– 2 активних ТР;</li> <li>– термокомпенсована;</li> <li>– температурна похибка кабелю виключена</li> </ul>	 <p>Активний ТР Компенсуючий ТР Одноісна деформація (розтяг / стиск)</p>		$e_0 = \frac{E}{4} k \epsilon_0$
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>– для деформації згину;</li> <li>– 4 активних ТР;</li> <li>– термокомпенсована;</li> <li>– температурна похибка кабелю виключена;</li> <li>– деформація розтягу / стиску включена</li> </ul>			$e_0 = E k \epsilon_0$

точки з'єднання плечей – вершинами або вузлами мосту. Міст Уїтстона з живленням від джерела постійної напруги складається з трьох функціональних частин (табл. 1). Це джерело напруги  $E$ , чотири резистори, що утворюють міст та схема реєстрації  $e_0$ . Схема реєстрації включає резистор навантаження  $R_m = \infty$ , оскільки приймається, що струм, який протікає через міст, не відводиться на навантаження. Така ситуація спостерігається, коли сигнал з мостової схеми надходить на вхід електронного підсилювача або аналого-цифрового перетворювача (АЦП).

Залежно від кількості ТР, що включаються в вимірювальний міст, можливі три модифікації мостової схеми Уїтстона [10]: «чверть мосту» (модифік. 1 табл. 1), «напівміст» (модифік. 2 табл. 1) і «повний міст» (модифік. 3 табл. 1). В табл. 1 представлено приклади модифікації мостової схеми в залежності від поставленої задачі [11]. Також в табл. 1 представлено формули перетворення зміни напруги в деформації.

Для ефективного вимірювання деформацій за допомогою ТР при монтажних роботах необхідно дотримуватись ряду вимог. Основні вимоги відносяться як до ТР, так і до поверхні об'єкту вимірювань. Умовно вимоги можна розділити на наступні групи:

- підготовка ТР (включає зовнішній огляд, перевірку опору і очищення);
- підготовка досліджуваної деталі (очищення, зачищення та обезжирення);
- нанесення ліній розмітки (результати залежать від позиціонування ТР на об'єкті досліджень);
- наклейка та контроль якості наклеювання ТР (забезпечення суцільності клею в зоні контакту ТР та об'єкту досліджень);

Таблиця 2. Технічні характеристики вимірювальної системи

Назва параметру	Значення
Зовнішнє живлення, В	12(5...15)
Вбудований стабілізатор напруги, В	3.3
Точність елементів та живлення тензометричного мосту, %	0,1
Точність елементів вимірювального підсилювача, %	0,1
Точність вимірювання вихідної напруги тензометричного мосту, %	0,025
Діапазон вихідної напруги, В	від -9 до 9
Коефіцієнт підсилення сигналу	1000
Ємність пам'яті результатів вимірювання, МБ	368
Стандарт передачі даних	RS-485
Швидкість передачі даних, біт/с	62500

– захист ТР від вологи (нанесення захисного покриття).

Для поставленої задачі (вимірювання деформацій на реальних підземних трубопроводних системах) обрано повністю термокомпенсовану «напівмісткову» модифікацію мостової схеми Уїтстона представлена під номером 2 табл. 1. В цьому випадку половина «напівмісткової» схеми, що являє собою систему вимірювання, складається з двох ТР, позначених на прикладі як  $Rg_1$  та  $Rg_2$ . Перший ТР  $Rg_1$  клеїться на поверхню трубопроводу та заміряє безпосередньо деформацію матеріалу трубопроводу. Другий ТР  $Rg_2$  клеїться на окремий металевий зразок, який розташовують в зоні виміру першого ТР. Таким чином, за допомогою другого тензометричного резистору  $Rg_2$  враховується можлива температурна нестабільність вимірювального ТР  $Rg_1$  (термокомпенсація). Інша половина «напівмісткової» схеми представляє собою два звичайних резистори однакового опору  $R$ , що розташовуються в системі зчитування та запису.

На схемі номер 2 табл. 1 –  $E$  – напруга живлення мостової схеми (В);  $e_0$  – вихідна напруга (В). При проведенні контролю система зчитування та запису зберігає дані в вольтах. Зв'язок між вихідною напругою та деформацією визначається за формулою:

$$e_0 = \frac{E}{4} k \varepsilon \quad (1)$$

де  $k$  – коефіцієнт тензочутливості резисторів;  $\varepsilon$  – деформація.

Загальна деформація визначається відносно початкової (значення  $e_0$  фіксується після остаточного приклеювання резисторів) за формулою:

$$\varepsilon_{Total} = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_i}{K_p} \quad (2)$$

де  $K_p$  – коефіцієнт підсилення АЦП;  $\varepsilon_{Total}$  – загальне значення деформації;  $\varepsilon_0$  – початкове значення

деформації ТР під час монтування;  $\varepsilon_i$  – крайнє значення деформації.

Система зчитування та запису складається з АЦП, електронного підсилювача, мікропроцесора, блоку живлення та модуля пам'яті, за допомогою яких і реалізовано збір та запис даних вимірювань. Система зчитування та запису розташовується безпосередньо на поверхні труби та за допомогою чутливих елементів проводить виміри деформацій. Інформація про виміри в часі з інтервалом в 1 годину записується у внутрішню пам'ять вимірювальної системи і раз у 24 години передається до системи збору та збереження даних. Технічні характеристики системи зчитування та запису представлено в табл. 2. Принцип вимірювання напружено-деформованого стану підземних газопроводів представлено на рис. 2.

Обрана система вимірювань деформацій була зібрана та протестована в лабораторних умовах на випробувальній машині. В якості системи чутливих елементів використовували ТР, які здатні забезпечити надійні та довготривалі вимірювання деформацій з врахуванням впливу всіх зовнішніх (температура, вологість середовища в зоні вимірювання тощо) та внутрішніх (точність вимірювань, енерговитрати та ін.) чинників. Таким чи-

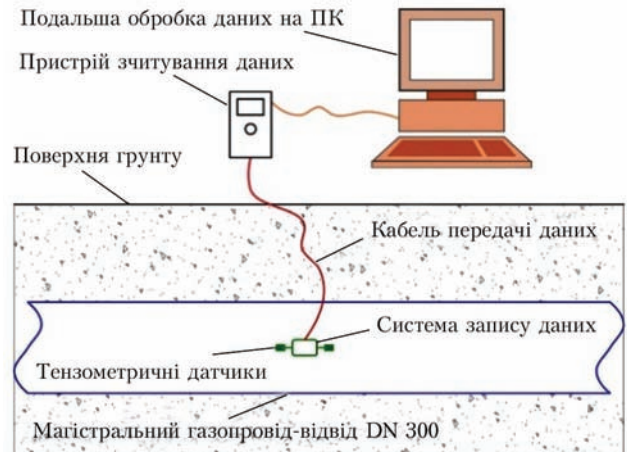


Рис. 2. Схема моніторингу напружено-деформованого стану

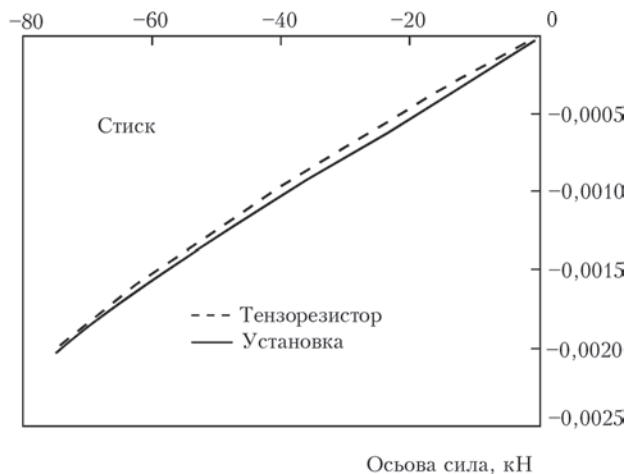
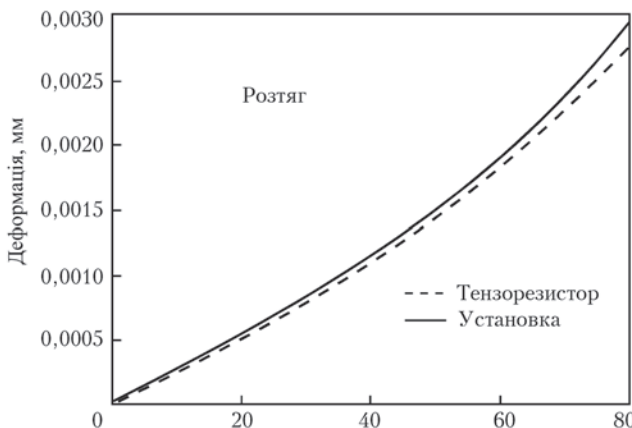


Рис. 3. Результати тарувальних випробувань



ном, вибрано ТР на поліімідній плівці з довжиною бази 10 мм. Матеріал фольгової решітки константан, при цьому коефіцієнт чутливості складає від 2,0 до 2,2. Діапазон робочих температур ТР від -80 до 150 °С.

В якості випробувального зразка використано металевий стрижень прямокутного поперечного перерізу. Матеріал та геометричні розміри зразка вибрані таким чином, щоб забезпечити максимальний робочий діапазон функціонування ТР. На рис. 3 представлено результати випробування обраної «напівмісткової» схеми на розтяг та стиск. За результатами випробувань визначено похибку вимірювань деформацій, яка складає менше 5 % як для розтягу, так і для стиску.

**Розрахунок та моніторинг напруженого стану.** Розрахунки напружено-деформованого стану трубопроводів виконувались з використанням попередньо створеної чисельно-аналітичної процедури [3]. В основі процедури лежать ефективні аналітичні розв'язки, які записуються для елементарної ділянки трубопроводу в залежності від типу взаємодії між ґрунтом та поверхнею трубопроводу. Таким чином, для випадку пружної взаємодії рівняння переміщень та сил мають вигляд:

$$\begin{aligned}
 u(x) &= u_0 ch(\beta x) - \frac{N_0}{\beta EF} sh(\beta x) + \mu_0 (1 - ch(\beta x)) + \\
 &+ \mu_1 \left( x - \frac{1}{\beta} sh(\beta x) \right); \\
 N(x) &= -u_0 EF \beta sh(\beta x) + N_0 ch(\beta x) + \\
 &+ \mu_0 EF \beta sh(\beta x) + \mu_1 EF (ch(\beta x) - 1),
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

де  $E$  – модуль Юнга;  $F$  – площа поперечного перерізу трубопроводу  $F \approx 2\pi R t$ ;  $\mu_0, \mu_1$  – параметри прямої лінії, яка використовується на певній ділянці для апроксимації переміщень ґрунту; параметр  $\beta$  визначається із співвідношення:

$$\beta = \sqrt{\frac{\pi D_n C_x}{EF}},
 \tag{4}$$

де  $D_n$  – зовнішній діаметр трубопроводу;  $C_x$  – узагальнений коефіцієнт дотичного опору ґрунту.

У випадку пластичної взаємодії рівняння переміщень та сил мають вигляд:

$$\begin{aligned}
 u(x) &= u_0 - \frac{N_0}{EF} x - \frac{\bar{q} x^2}{2EF}; \\
 N(x) &= N_0 + \bar{q} x,
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

де  $\bar{q}$  – граничний опір ґрунту зрушенню.

Процедура враховує взаємне переміщення труби та ґрунту на даній ітерації. Її особливість полягає в використанні поняття базової геометрії осьової лінії трубопроводу на кожній ітерації (по якій визначається тип взаємодії земля-труба на наступній ітерації) та повної геометрії осьової лінії трубопроводу, що розраховується на даній ітерації. Уточнення базової геометрії виконується за допомогою адаптивного коефіцієнта руху, що зменшує величину корекції переміщень, якщо результати починають віддалятися (змінюється знак максимуму різниці базових і повних переміщень), і дещо повільніше збільшує корекцію переміщень, якщо базова та повна геометрії осьової лінії трубопроводу наближаються.

За результатами розрахунків формувались заходи щодо забезпечення надійної експлуатації та визначались місця встановлення систем моніторингу для подальшого контролю напруженого стану газопроводу-відводу. Типовими місцями для встановлення систем моніторингу є зони реалізації максимальних напружень в результаті відпрацювання шахтної виробки.

На рис. 4 представлено приклад системи, змонтованої на реальному трубопроводі (а), та дистанційний прилад для зчитування даних (б).

Активне просідання ґрунту відбувається безпосередньо після перетину «вікном» лави лінії га-



Рис. 4. Система моніторингу, що змонтована на трубопроводі (а) та дистанційний прилад для зчитування даних (б)

зопроводу-відводу (віддаленість «вікна» лави від трубопроводу не перевищує 10 м) і, відповідно до основних характеристик лави, триває протягом приблизно 2...4 місяців [5]. За цей період переміщення ґрунту від впливу шахтної лави набирають 80...90 % від максимальних значень, після чого настає період уповільнення розвитку переміщення ґрунту. Для отримання повної картини процесу навантаження газопроводу-відводу в часі з подальшою релаксацією системи моніторингу напружено-деформованого стану встановлювались до початку впливу шахтних лав на ділянки магістральних газопроводів-відводів.

На рис. 5 представлено результати розрахунку напруженого стану газопроводу-відводу Ду 300 в зоні впливу Лави 1. Суцільною лінією представлено прогнозний напружений стан вздовж газопроводу в результаті відпрацювання Лави 1. Штриховою лінією представлено напружений стан газопроводу після реалізації заходів, пов'язаних зі зменшенням сил взаємодії між трубою та ґрунтом шляхом розкопок двох ділянок з подальшою їх засипкою. Також на рис. 5 представлено місця становлення систем вимірювання та результати неперервного моніторингу напруженого стану. Відмітимо, що на ділянці газопроводу в зоні впливу Лави 1 встановлено дві системи в зонах мак-

симальних розтягуючих напружень (системи № 1 та № 3) та однієї системи в зоні максимальних стискаючих напружень (система № 2). Для кожної системи окремо відмічені максимальні значення заміряних напружень за весь період моніторингу.

На рис. 6 аналогічно до рис. 5 представлено результати розрахунку та моніторингу напруженого стану газопроводу-відводу Ду 300 в зоні впливу Лави 2.

Результати моніторингу напруженого стану як для Лави 1, так і для Лави 2 підтверджують коректність створених розрахункових методів аналізу. Завдяки можливості неперервного моніторингу зафіксовано процеси релаксації напружень в газопроводах з часом. Важливим моментом є той факт, що процеси релаксації в зонах реалізації розтягуючих напружень, що віддалені від центру шахтної виробки, протікають швидше ніж в зонах стискаючих в центрі шахтної виробки. Відповідно до роботи [5] процеси релаксації враховуються шляхом введення коефіцієнту пристосування трубопроводу до деформаційних впливів від минулих підробок. Відмітимо, що введений коефіцієнт є досить тривалим по часу (перших два роки після відпрацювання приймається 0,7) і є однаковим по всій протяжності трубопроводу в зоні відпрацювання лави і суперечить реальним

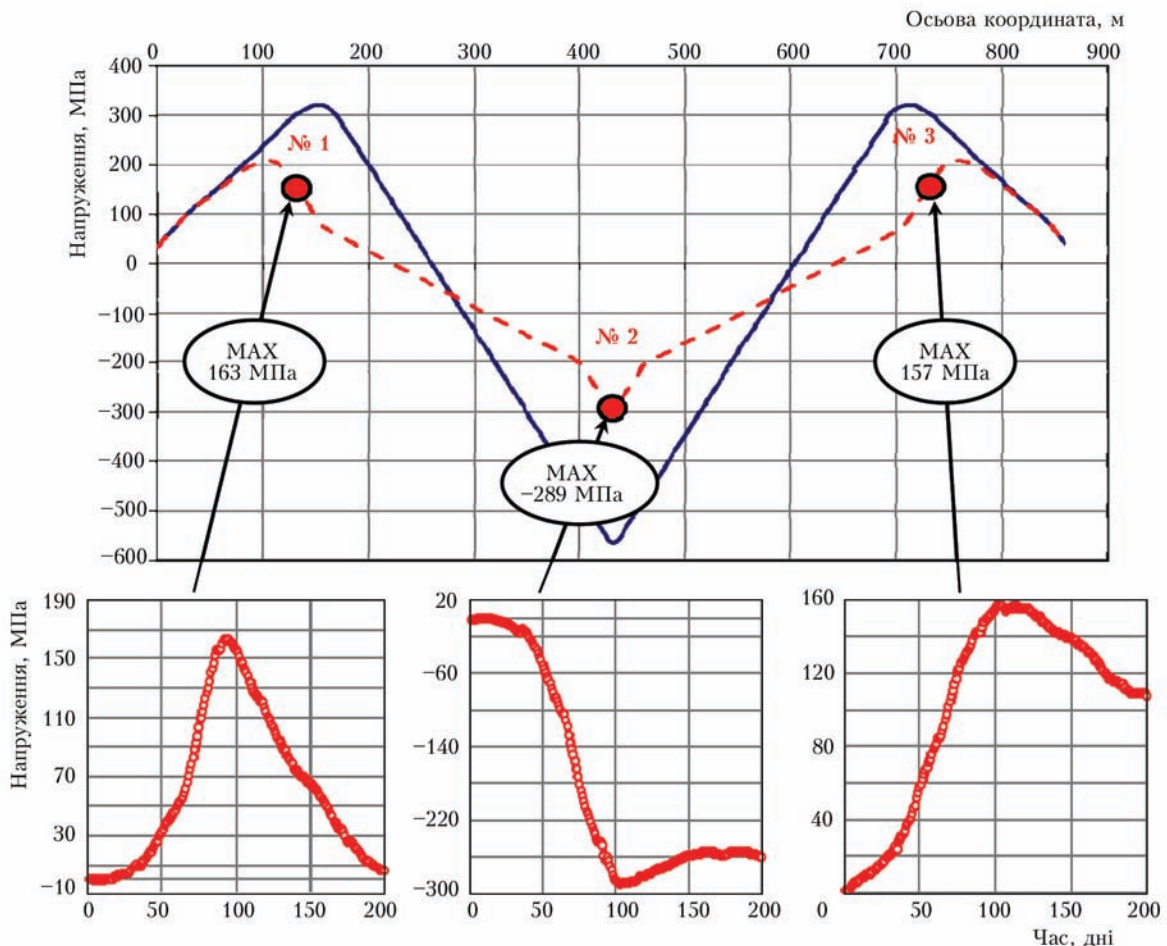


Рис. 5. Результати розрахунку та моніторингу напруженого стану газопроводу в зоні впливу Лави 1

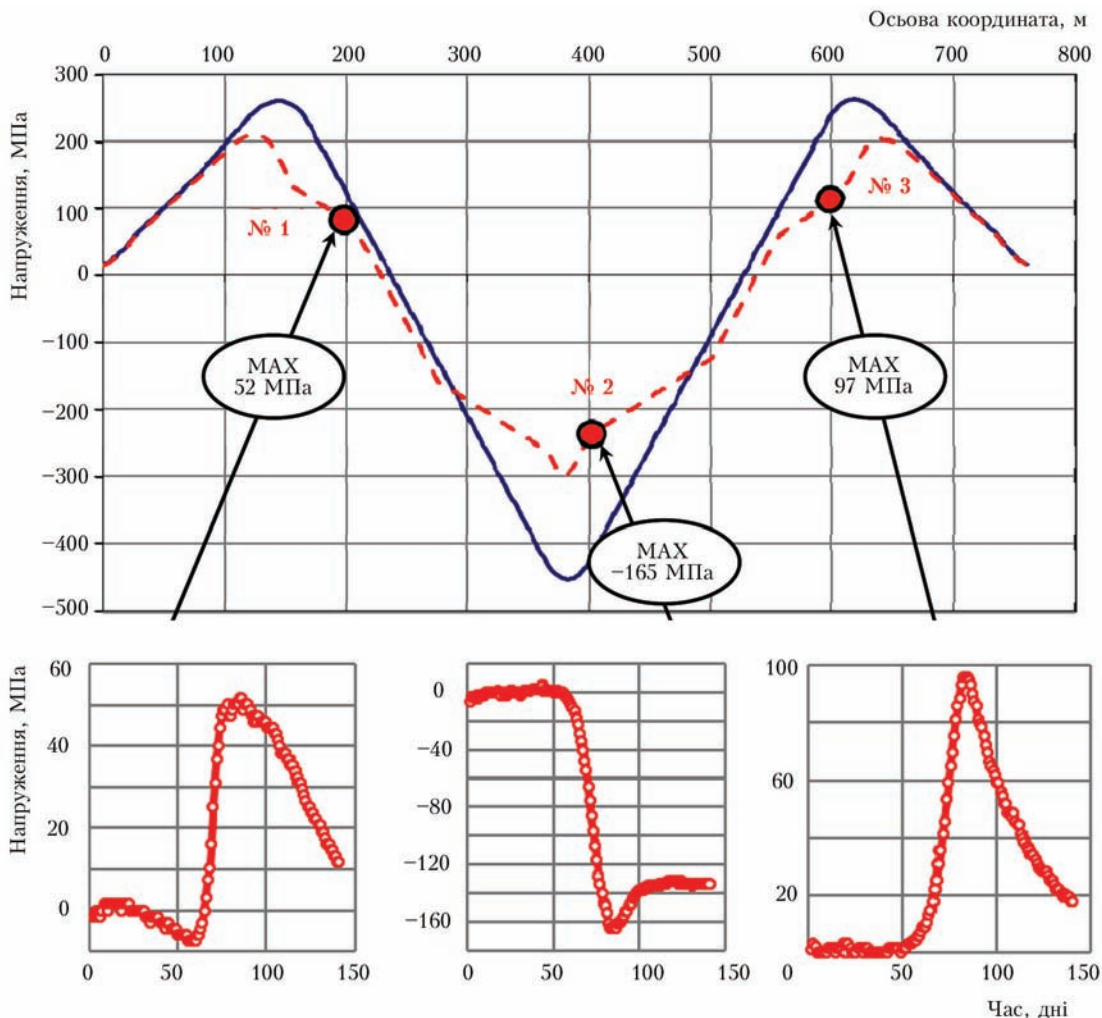


Рис. 6. Результати розрахунку та моніторингу напруженого стану газопроводу в зоні впливу Лави 2

процесам, зафіксованим з використанням систем моніторингу.

### Висновки

Основні методики, згідно яких виконується оцінка технічного стану об'єктів на підірваних територіях України ґрунтується на методах, розроблених ще в 1960-1970-х роках і містить цілий ряд суттєвих недоліків. Найважливішими серед них є твердження, що максимальні напруження в магістральних газопроводах виникають в зоні максимальних деформацій ґрунту та врахування релаксації напружень лише шляхом введення коефіцієнтів щодо зниження інтенсивностей зсуву земної поверхні в часі, які є однаковими для досить тривалих часових періодів.

Розроблено автоматичну систему вимірювань та неперервного запису деформацій газопроводу в часі. Система моніторингу встановлена на ділянках магістрального газопроводу-відводу Ду 300, що зазнають впливу зрушень земної поверхні від виробки лав.

Результати моніторингу напруженого стану засвідчили коректність розрахункових методів аналізу та надали можливість дослідити процеси релаксації напружень в часі після виходу шахтної

лави із зони впливу на газопровід. Знайдено, що процес релаксації швидше протікає в зонах розтягуючих напружень, що віддалені від центру шахтної виробки, ніж в зонах стискаючих напружень в центральній частині шахтної виробки. Отримані дані будуть використані на наступних етапах роботи при розробці законів релаксації напружень та врахування історії навантаження магістрального газопроводу.

### Список літератури

1. Посыльный Ю. В. (2001) *Геометрия мутьды сдвижения земной поверхности над горными выработками угольных шахт*. Автореф. дис. на соискание ученой степени д.-ра техн. наук. Новочеркасск.
2. (1988) *Инструкция по наблюдениям за сдвижением горных пород и земной поверхности при подземной разработке рудных месторождений*. Москва, Недра.
3. Ориняк І. В., Ясковець З. С. Метод функцій внутрішнього відклику для оцінки напруженого стану підземних магістральних газопроводів в зонах шахтних виробок. Проблеми міцності (Подана до друку 12.02.2018).
4. Гусейнов К. Б. (2015) Мониторинг напряженно-деформированного состояния оползневых участков линейной части магистральных газопроводов. *Нефть, газ и бизнес*, 41–43.
5. ГСТУ 101.00159226.001-2003. (2004) *Правила підробки будівель, споруд і природних об'єктів при видобуванні вугілля підземним способом*. Київ.
6. Martin P. Derby, Marc D. Saunders, Benjamin Zand. (2016) *Geotechnical instrumentation: monitoring longitudinal stress*

- of a high pressure pipeline during longwall mining operations – a case study in west Virginia. *International Pipeline Conference IPC2016, September 26–30, 2016, Calgary, Alberta, Canada.*
7. (2005) American Lifelines Alliance, «Guidelines for the Design of Buried Steel Pipe», American Lifelines Alliance, American Society of Civil Engineers, July 2001 (with addenda through February 2005).
  8. (2012) ASME B31.8. *Gas Transmission and Distribution Piping System*, ASME Code of Pressure Piping B3, American Society of Mechanical Engineers.
  9. (2013) API 1104. *Welding of Pipelines and Related Facilities*, American Petroleum Institute, Twenty first edition. September 2013.
  10. Серьезнов А. Н., Шашурин А. К. (1990) *Методы и средства измерения в прочностном эксперименте*. Москва, Изд-во МАИ.
  11. *Precise and flexible strain gauges*. Tokyo Sokki Kenkyuio Co., Ltd. www.tml.jp/e

#### References

1. Poslyny, Yu.V. (2001) *Geometry of the trough of the earth's crust moving over mining operations of coal mines*. In: Syn. of Thesis for Cand. of Techn. Sci. Degree. Novocherkassk [in Russian].
2. (1988) *Instructions for observing the movement of rocks and the earth's surface during underground mining of ore deposits*. Moscow, Nedra [in Russian]. Moscow, Nedra [in Russian].
3. Orynyak, I.V., Yaskovets, Z.S. *Method of internal response function for assessment of the stressed state of underground main gas pipelines in mining operation zones*. Problemy Mitsnosti (in the press 12.02.2018) [in Ukrainian].
4. Gusejnov, K.B. (2015) Monitoring of stress-strain state of landslide section of the linear part of the main gas pipelines. *Neft, Gaz i Biznes*, 41-43 [in Russian].
5. GSTU 101.00159226.001-2003 (2004): *Rules for working out buildings, structures and natural objects during the extraction of coal underground*. Kyiv [in Ukrainian].
6. Martin, P. Derby, Marc D. Saunders, Benjamin Zand (2016) *Geotechnical instrumentation: Monitoring longitudinal stress of a high pressure pipeline during longwall mining operations – a case study in west Virginia*. In: *Proc. of Int. Pipeline Conf. IPC2016* (September 26-30, 2016, Calgary, Alberta, Canada).
7. (2005) *American Lifelines Alliance: Guidelines for the design of buried steel pipe*. American Society of Civil Engineers, July 2001 (with addenda through February 2005).
8. (2012) *ASME B31.8: Gas transmission and distribution piping system*, ASME Code of Pressure Piping B3, American Society of Mechanical Engineers.
9. (2013) API 1104: *Welding of pipelines and related facilities*. API, September 2013, 21st Ed.
10. Seryoznov, A.N., Shashurin, A.K. (1990) *Methods and measurement means in strength experiment*. Moscow, Izd-vo MAI [in Russian].
11. *Precise and flexible strain gauges*. Tokyo Sokki Kenkyuio Co., Ltd. www.tml.jp/e

З. С. ЯСКОВЕЦ, И. В. ОРЫНЯК

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко  
НАН Украины. 01014, г. Киев, ул. Тимирязевская, 2.  
E-mail: info@ipp.kiev.ua

МОНИТОРИНГ И РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПОДЗЕМНЫХ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

#### В ЗОНАХ ШАХТНЫХ ВЫРАБОТОК

В работе описана система и результаты мониторинга напряжений в трубопроводах, находящихся в зоне влияния шахтных выработок. Измерение деформаций реализовано с помощью тензометрических резисторов, собранных в модифицированную термокомпенсированную полумостовую схему Уитстона. С целью непрерывного мониторинга полумостовая схема дополнена системой автоматизированного считывания и записи. Места установки систем мониторинга определялись на основе прогнозных расчетов напряженного состояния газопроводов от влияния шахтных выработок. Результаты мониторинга подтвердили корректность использованных расчетных методов. Кроме того, зафиксировано процессы нагрузки и релаксации напряжений во времени. Обнаружено, что нагрузка подземного газопровода в процессе отработки шахтной выработки происходит равномерно как на участках сжатия, так и на участках растяжения. После прохождения шахтной выработки зафиксировано, что процессы релаксации напряжений в газопроводе протекают на разных участках неравномерно. В растянутых (отдаленных от центра шахтной выработки) зонах газопровода релаксация протекает значительно быстрее, чем в сжатых (в центре шахтной выработки).

Ключевые слова: магистральный трубопровод, шахтная выработка, напряженное состояние, мониторинг, мостовая схема Уитстона

#### MONITORING AND CALCULATION OF STRESSED STATE OF UNDERGROUND MAIN GAS PIPELINES IN MINE WORKING ZONES

S.Z.YASKOVETS, I.V.ORINYAK

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

The work provides a description of the system and results of monitoring stresses in pipelines that are located in the zone of impact of mine workings. Strain measurement was realized using strain gauge resistors, collected into a modified heat-compensated half-bridge Wheatstone circuit. For the purpose of continuous monitoring, the half-bridge circuit is complemented by a system of automatic reading and recording. The locations of mounting the monitoring systems were determined on the basis of predictive calculations of stressed state of gas pipelines under the impact of mine workings. Monitoring results confirmed the correctness of the used computational methods. Moreover, processes of loading and stress relaxation in time were recorded. It is found that loading of an underground gas pipeline during testing of mine working occurs uniformly, both in the compression and tension regions. After passing the mine working, it was recorded that the processes of stress relaxation in the gas pipeline proceed non-uniformly in different regions. In the gas pipeline zones under tension (removed from the mine working center) relaxation runs much faster than in the compressed region (in the mine working center).

Keywords: main pipeline, mine working, stressed state, monitoring, Wheatstone bridge circuit

Надійшла до редакції  
13.03.2018

# ОПТОЕЛЕКТРОННИЙ СЕНСОРНИЙ ТЕЧОШУКАЧ ДЛЯ ДЕТЕКТУВАННЯ ВИТОКІВ АМОНІАКУ

П. А. МАНОРИК<sup>1</sup>, О. В. ШУЛЬЖЕНКО<sup>1</sup>, О. Л. КУКЛА<sup>2</sup>, О. М. ФЕДЧЕНКО<sup>2</sup>, Ю. М. ПОСИПАЙКО<sup>3</sup>,  
В. М. ГРЕБЕННИКОВ<sup>1</sup>, С. О. СОТНІК<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Інститут фізичної хімії ім. Л. В. Писаржевського НАН України. 03028, м. Київ, просп. Науки, 31.

<sup>2</sup>Інститут фізики напівпровідників ім. В. С. Лашкарьова НАН України. 03028, м. Київ, просп. Науки, 41.

<sup>3</sup>ІЕЗ ім. С. О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

Розроблено портативний оптоелектронний сенсорний течешукач для детектування витоків амоніаку крізь наскрізні дефекти промислових об'єктів, хімічний сенсор та аеродинамічний пристрій для транспортування проби аналізу від дефекту до сенсора як складові приладу. З'ясовано на підставі аналізу результатів досліджень, що прилад здатен надійно детектувати концентрації амоніаку порядку 1 ppm, ефективно функціонує в діапазоні концентрацій амоніаку 1...10 ppm. Визначено оптимальні умови, за яких доцільно експлуатувати прилад. Бібліогр. 9, рис. 6.

*Ключові слова:* оптоелектронний сенсорний течешукач, амоніак, витокі, детектування

Оптоелектронні сенсорні системи, принцип дії яких ґрунтується на перетворенні певних інформативних ознак оптичного зображення об'єкта в електричні сигнали й порівняльній оцінці таких ознак зображення з опорною моделлю, впродовж півстоліття широко використовують в промисловості для вимірювань та контролю параметрів багатьох технологічних процесів [1]. Завдяки прогресу мікроелектроніки й обчислювальної техніки в останні десятиріччя з'явилися малогабаритні, надійні й відносно дешеві кольорові відеотехнічні засоби та спеціальні програмні продукти на базі високорівневих мов програмування, за допомогою яких можна в реальному масштабі часу сканувати миттєві зображення навіть доволі малих за габаритами об'єктів, надійно детектувати ознаки таких зображень, перетворювати їх в електричні сигнали та здійснювати комп'ютерне оброблення цих сигналів. Це створює умови для розроблення якісно нових високочутливих компактних оптоелектронних сенсорних приладів, зокрема – течешукачів, налаштованих на детектування витоків різних екологічно небезпечних речовин крізь наскрізні дефекти промислових конструкцій.

Метою даної роботи було розроблення портативного оптоелектронного сенсорного течешукача (ОЕСТ) для детектування витоків амоніаку крізь наскрізні дефекти промислових конструкцій та оцінка можливостей його використання.

Вибір такого об'єкта детектування, як амоніак, обумовлений тим, що його широко використовують в хімічній промисловості як один з основних реагентів для виробництва речовин і матеріалів різного призначення, а також не менш інтенсивно використовують в різних областях

техніки як охолоджуючий агент [2]. Це актуалізує розроблення надійних методів і засобів швидкого діагностування витоків цієї екологічно небезпечної речовини в довіділля.

На рис. 1 представлено блок-схему розробленого ОЕСТ. Блок відбору проби транспортує амоніак від наскрізного дефекту до хімічного сенсора, внаслідок чого змінюються інформативні ознаки поверхні сенсора. Оптоелектронний блок реєстрації зміни інформативних ознак сканує поверхню сенсора в режимі відбиття світла, перетворює інформативні ознаки оптичного зображення поверхні сенсора в електричні сигнали та здійснює підготовку сигналів для подальшого оброблення. Вихідні сигнали від цього блоку надходять до пристрою оброблення зображення поверхні сенсора (персонального комп'ютера), де оброблюються за допомогою спеціально створеного на базі Matlab 7 [3] програмного забезпечення. Останнє дає змогу спостерігати за процесом зміни інформативних ознак поверхні хімічного сенсора в режимі реального часу, захоплювати зображення поверхні сенсора в необхідний момент часу для його подальшого порівняльного аналізу з попередньо створеною в банку даних програми опорною моделлю (з початковим станом зображення поверхні сенсора до впливу на неї амоніаку або зі станом зображення поверхні сенсора після впливу на неї амоніаку певної концентрації) й видавати сигнал про наявність

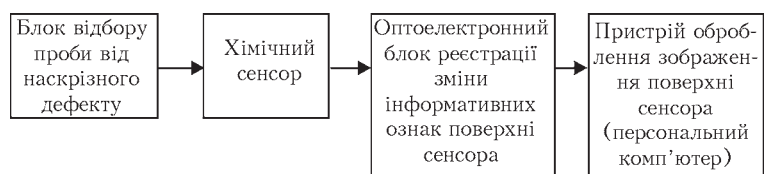


Рис. 1. Блок-схема оптоелектронного сенсорного течешукача

витоку амоніаку крізь дефект або про те, що величина витоку амоніаку перевищує допустиму норму.

Амоніак як окремо взята хімічна речовина надійно детектується рядом кислотно-основних індикаторів, зокрема кислотними індикаторами, що належать до групи сульфоталеїнів [4]. При цьому перебіг оборотної реакції амоніаку з такими індикаторами супроводжується зміною кольору останніх у видимій області спектру. Тому цілком доречним є використання кислотно-основного індикатора з відповідними характеристиками як основного компонента хімічного сенсора на амоніак та зміни кольору й інтенсивності забарвлення оптичного зображення поверхні сенсора як інформативних ознак.

При виборі якісного складу хімічного сенсора на амоніак як первинного перетворювача течошукача та методики виготовлення сенсора керувались такими вимогами:

- колір поверхні сенсора при контакті з амоніаком має змінюватись контрастно, а після вилучення амоніаку з реакційної зони сенсор має відновлюватись до початкового стану;
- інтенсивність забарвлення поверхні сенсора в присутності амоніаку повинна змінюватись пропорційно його концентрації;
- вплив температури й вологості повітря на характеристики сенсора має бути мінімальним;
- підкладка сенсора має бути проникною для амоніаку.

З урахуванням перших трьох вимог як основний компонент для хімічного сенсора на амоніак обрано кислотно-основний індикатор бромкрезоловий зелений спирторозчинний (ІБКЗС), який через різку зміну кольору й велику інтенсивність забарвлення в присутності амоніаку є одним з найбільш ефективних реагентів для детектування цієї речовини. Інтервал контрастного переходу кольору зазначеного індикатора знаходиться в межах від рН 3,8 (жовтий колір кислотної форми) до рН 5,4 (синій колір основної форми). Максимум поглинання жовтого кольору спостерігається при довжині хвилі біля 442 нм, а синього кольору – при довжині хвилі 620 нм, причому інтенсивність максимуму смуги поглинання при цій довжині хвилі зростає пропорційно зсуву значення рН в лужну область. Як і для більшості кислих індикаторів, що належать до групи сульфоталеїнів, зміна температури аж до 100 °С мало впливає на інтервал переходу кольору ІБКЗС. Крім того, він помірно розчинний у воді [5].

З урахуванням четвертої вимоги як підкладку для хімічного сенсора на амоніак обрано тонку (біля 0,2 мм) бавовняну вибілену тканину типу бязі з поверхневою щільністю біля 130 г/м<sup>2</sup> і проникністю для повітря біля 100 дм<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·с [6].

Щоб одержати хімічний сенсор, згадану підкладку за методикою, що детально описана в роботі [7],

спочатку обробляли розчином мінеральної кислоти до досягнення нейтральної реакції водної витяжки, промивали дистильованою водою, сушили до видалення води, просочували розчином ІБКЗС, а потім сушили до вилучення розчинника.

Основною складовою оптоелектронного блоку реєстрації зміни інформативних ознак поверхні сенсора слугує кольорова веб-камера моделі А4ТЕСН РК-730 МІ з власним кільцевим світлодіодним освітлювачем як джерелом білого світла. Реєстрація цим оптоелектронним блоком зміни кольору поверхні хімічного сенсора при впливі на нього амоніаку або в процесі відновлення сенсора до початкового стану здійснюється шляхом вимірювання веб-камерою *R* (червоної), *G* (зеленої) та *B* (блакитної) компонент відбитого від поверхні сенсора світла (на довжинах хвиль 700, 546 та 436 нм відповідно). За допомогою спектральних фільтрів, вбудованих у веб-камеру, остання видає в послідовному форматі на пристрій оброблення зображення поверхні сенсора (комп'ютер) три вихідні цифрові сигнали, які відповідають саме *R, G, B*-складовим відбитого світла.

Задля зменшення впливу на відгук хімічного сенсора нерівномірності розподілу по його поверхні світлового потоку, а також апаратних шумів (шумів веб-камери й джерела світла) розроблене програмне забезпечення визначає величину відгуку сенсора із застосуванням фазового методу комп'ютерного оброблення кольорового зображення поверхні зразка, який базується на понятті кольору як вектора й тому дозволяє визначати кутове положення вектора кольору в тривимірному *R, G, B*-просторі [8]. Згідно цього підходу зміни інтенсивностей складових світлового потоку, відбитого від поверхні зразка, зазвичай варіюються, однак їх співвідношення, що відповідає певному кольору поверхні, залишається практично незмінним. Відтак розташування вектора кольору в тривимірному *R, G, B*-просторі можна представити як:

$$\cos \alpha_R = \frac{R}{L}; \quad \cos \beta_G = \frac{G}{L}; \quad \cos \gamma_B = \frac{B}{L},$$

де  $\alpha_R, \beta_G, \gamma_B$  – кутове положення вектора кольору відносно осі *R, G* або *B* відповідно; *R, G, B* – амплітудні значення компонент вектора кольору;  $L = \sqrt{R^2 + G^2 + B^2}$  – абсолютне значення вектора кольору.

За інтегральний відгук розробленого хімічного сенсора на вплив амоніаку в подальшому приймали відхилення кутового положення вектора кольору поверхні сенсора від його початкового стану (до впливу на сенсор амоніаку), яке розраховували за формулою:

$$\Delta S = \sqrt{\left[ \frac{R_1}{L_1} - \frac{R_0}{L_0} \right]^2 + \left[ \frac{G_1}{L_1} - \frac{G_0}{L_0} \right]^2 + \left[ \frac{B_1}{L_1} - \frac{B_0}{L_0} \right]^2}, \quad (1)$$

де індекси 0 і 1 відповідають початковому та поточному стану поверхні сенсора (до і після впливу на сенсор амоніаку відповідно).

Досягти високої селективності хімічного сенсора за умов використання в його складі кислотно-основного індикатора як основного компонента практично неможливо. Тому для захисту розробленого сенсора від контакту з речовинами лужної природи, які можуть міститись в повітрі промислової зони й потенційно здатні впливати на сенсор, блок відбору проби амоніаку від наскрізного дефекту до хімічного сенсора виконано у виді аеродинамічного пристрою – безконтактного щупа зі струминною завісою, конструкція якого детально описана в роботі [9].

На рис. 2 у частковому розрізі схематично зображено розроблений безконтактний щуп зі струминною завісою в поєднанні з хімічним сенсором та оптоелектронним блоком. Як видно з цього рисунка, щуп складається з порожнистого корпусу 1, в нижній частині якого виконано центральний отвір 2 для введення проби амоніаку, що проникає крізь наскрізний дефект 3 стінки конструкції 4, до порожнини корпусу 1. Концентрично центральному отвору 2 для введення проби виконано кільцевий колектор 5, а нижче колектора 5 розташована кільцева порожнина 6. Кільцевий колектор 5 та кільцева порожнина 6 пневматично з'єднані між собою каналами 7, що рівномірно розташовані по колу. Крім того, кільцева порожнина 6 має наскрізний вихід у виді кільцевого щілинного сопла 8. Для виведення проби амоніаку з порожнини корпусу 1 передбачено струминний насос 9. В порожнині корпусу 1 закріплено хімічний сенсор 10. Проба амоніаку підводиться безпосередньо до сенсора 10 через патрубок 11. Над

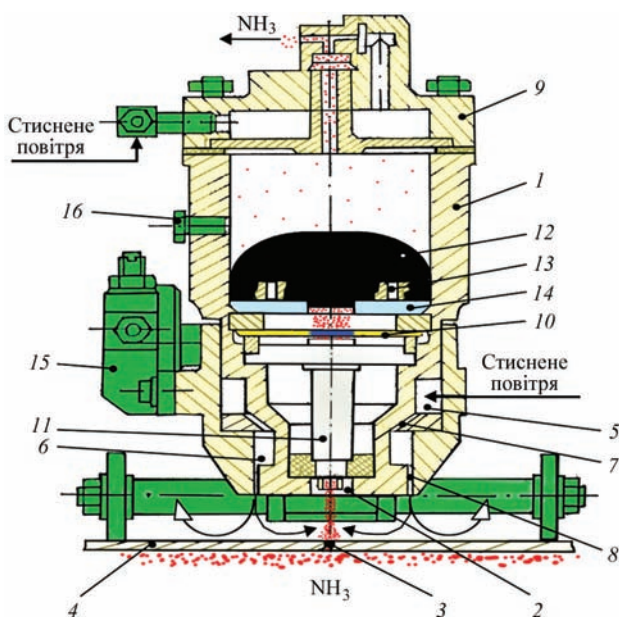


Рис. 2. Схематичне зображення безконтактного щупа зі струминною завісою в поєднанні з хімічним сенсором та оптоелектронним блоком (позначення див. текст)

сенсором 10 розташована згадана веб-камера 12 з власним кільцевим світлодіодним освітлювачем 13. Для рівномірного розподілу світла по поверхні сенсора 10 між ним та кільцевим світлодіодним освітлювачем 13 розміщено розсіювач світла 14. Для регулювання витрат газу, що потрапляє до струминного насосу 9, щуп забезпечений голчастим краном 15. Технологічний отвір в стінці корпусу 1, що закритий заглушкою 16, слугує для вимірювання тиску й концентрації амоніаку в порожнині корпусу 1 та для видалення аналіту з порожнини корпусу при попередній підготовці щупа до роботи. Щуп додатково оснащений не зображеними на цьому рисунку жорстко з'єднаною з корпусом 1 рукояткою й з'єднаним з цією рукояткою засобом еквідистантного переміщення щупа відносно поверхні стінки конструкції 4 на основі регульованого по висоті паралелограмного механізму.

При детектуванні ОЕСТ витоків амоніаку крізь наскрізні дефекти щуп встановлювали на поверхню стінки 4 (рис. 2) конструкції над місцем її з'єднання (наприклад, над зварним швом) та за допомогою паралелограмного механізму відводили його на певну відстань від поверхні й фіксували в цьому положенні. До кільцевого колектора 5 щупа подавали очищене (з балона) стиснене повітря, яке крізь канали 7 поступало до кільцевої порожнини 6, а з неї – до кільцевого щілинного сопла 8. Витікаючи крізь це сопло, стиснене повітря утворювало кільцевий струмінь, який, взаємодіючи з поверхнею стінки 4 конструкції, приймав на межі з нею форму віялового струменя, як схематично показано на рисунку. Як наслідок, між торцем щілинного сопла 8 і поверхнею стінки 4 конструкції створювався тиск дещо більший за атмосферний та утворювався торіодний вихор з лініями течії, що направлені до центрального отвору 2. У разі, коли при переміщенні щупа над з'єднанням стінки конструкції наскрізний дефект потрапляв у внутрішню зону кільцевого струменя, амоніак, що проникав крізь дефект, захоплювався торіодним вихором, під дією перепаду тиску транспортувався по патрубку 11 до сенсора 10, а потім вилучався з порожнини щупа струминним насосом 9. Таким чином, кільцева частина струменя повітря слугувала струминною завісою навколо центрального отвору 2 й унеможливила зв'язок порожнини щупа, де містився хімічний сенсор, з атмосферою. Віялова ж частина струменя повітря за умов розташування щупа над місцем витoku амоніаку (над наскрізним дефектом) слугувала засобом транспортування проби аналіту від дефекту до хімічного сенсора, а при розташуванні щупа над бездефектною ділянкою поверхні стінки конструкції, коли сенсор перебував в режимі обдування тільки повітрям, – засобом примусового відновлення поверхні сенсора до початкового стану.

Задля визначення величин максимальних інтегральних відгуків сенсора на вплив амоніаку різних концентрацій ОЕСТ попередньо тестували, продуваючи порожнину його щупа стисненими (надлишковий тиск порядку  $10^3$  Па) повітряно-амоніачними газовими сумішами з різним вмістом аналіту. Дослід повторювали тричі, дотримуючись однієї температури й кожний раз використовуючи сенсор з іншої партії. Одержані результати представлено на рис. 3.

Як видно з рисунка, характер залежностей, одержаних для трьох хімічних сенсорів, узятих з різних партій, схожий, хоча спостерігаються й деякі відмінності, які, вочевидь, обумовлені незначною різницею в складі й структурі зразків бавовняної тканини, що були використані як носії при виготовленні сенсорів. Положисту початкову ділянку залежності на рисунку можна ймовірно пояснити забарвленням поверхні сенсора в проміжній (між жовтим і синім) зеленій колір при впливі на сенсор амоніаку низьких концентрацій (від 0,1 до 1 ppm). Положисту ж кінцеву ділянку залежності – тим, що при впливі на сенсор амоніаку концентрації 1000 ppm і більше уся індикаторна речовина (ІБКЗС), яка міститься в носії, вступає в реакцію з аналітом. Як свідчить графік, мінімальна концентрація амоніаку, що може бути надійно детектована ОЕСТ, становить 1 ppm.

Примусово продуваючи порожнину щупа очищеним стисненим (надлишковий тиск порядку  $10^3$  Па) повітрям після введення в неї кожної з повітряно-амоніачних сумішей і при цьому реєструючи величину інтегрального відгуку сенсора, визначали час, який необхідний для відновлення сенсора до початкового стану. В результаті було з'ясовано, що при продуванні порожнини щупа повітряно-амоніачними сумішами з вмістом аналіту  $\leq 10$  ppm, а потім очищеним повітрям, час повної релаксації сенсора становить десятки секунд. У разі ж використання газових сумішей з більшим вмістом амо-

ніаку час повної релаксації сенсора після його обдування повітрям істотно (до декількох хвилин) збільшується. На рис. 4 представлено типову поведінку сенсора при його обдуванні повітрям після взаємодії з амоніаком концентрації  $> 10$  ppm.

Звідси можна зробити висновок про те, що ОЕСТ з безконтактним щупом зі струминною завісою в поєднанні з хімічним сенсором на основі ІБКЗС краще використовувати для детектування витоків крізь дефекти конструкцій такої кількості амоніаку, концентрація якого після захоплення аналіту тороїдним вихором і транспортування під дією перепаду тиску до сенсора 10 (рис. 2) не буде перевищувати 10 ppm.

Використовуючи щуп, у якому діаметр щілинного сопла 8 (рис. 2) становив 30 мм і ширина сопла в радіальному напрямку – 0,3 мм та діаметр патрубків 11 – 6 мм, а його довжина – 15 мм, було досліджено, як впливає швидкість витікання повітря зі щілинного сопла на величину інтегрального відгуку хімічного сенсора ОЕСТ. Для цього щуп розташовували на певній відстані від імітатора поверхні стінки конструкції безпосередньо над контрольною течєю з величиною потоку амоніаку порядку  $10^{-4}$  м<sup>3</sup> Па/с, яку було попередньо вбудовано в стінку імітатора. Швидкість витікання повітря зі щілинного сопла щупа варіювали зміною величини надлишкового тиску повітря, яке від балона через редуктор подавали до кільцевого колектора 5 щупа.

Одержані дані представлені на рис. 5. Як видно з цього рисунка, незалежно від відстані щупа до імітатора поверхні, де розташована контрольна теча як джерело витoku амоніаку, найбільша величина відгуку хімічного сенсора ОЕСТ досягається при швидкості витікання повітря зі щілинного сопла щупа біля 30 м/с. Вочевидь це обумовлено тим, що при такій швидкості витікання повітря крізь щілинне сопло з вище зазначеними геометричними параметрами створюються найбільш сприятливі (з

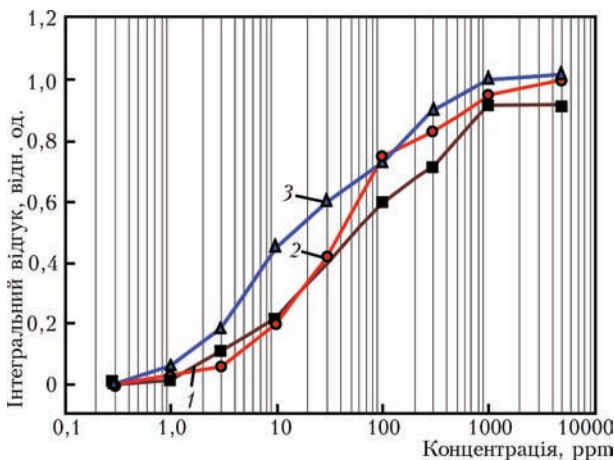


Рис. 3. Залежність інтегрального відгуку хімічного сенсора ОЕСТ від концентрації амоніаку в повітряно-амоніачній газовій суміші, що подається до порожнини безконтактного щупа (температура  $20 \pm 1$  °C)

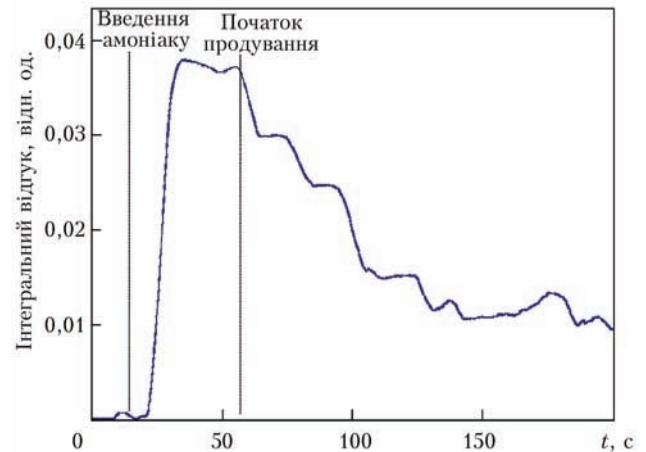


Рис. 4. Типова кінетична крива зміни інтегрального відгуку хімічного сенсора ОЕСТ при продуванні порожнини його щупа спочатку амоніаком концентрації  $> 10$  ppm, а потім повітрям (температура  $20 \pm 1$  °C)



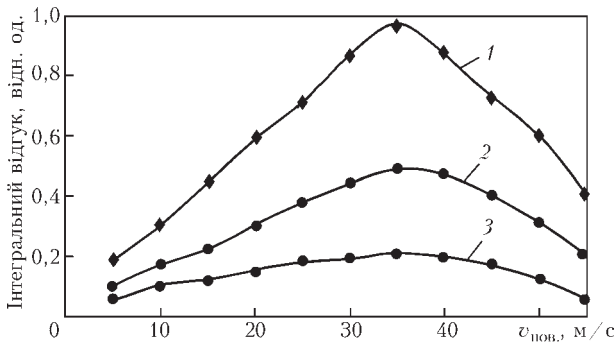


Рис. 5. Залежність інтегрального відгуку хімічного сенсора ОЕСТ від швидкості витікання повітря зі щільного сопла щупа (відстань щупа від імітатора поверхні з контрольною течєю порядку  $10^{-4}$  м<sup>3</sup> Па/с як джерелом витоку амоніаку: 1 – 5 мм; 2 – 3 мм; 3 – 1 мм, температура  $20 \pm 1$  °С)

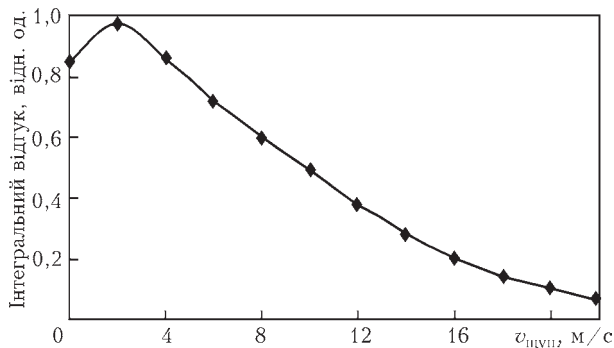


Рис. 6. Залежність інтегрального відгуку хімічного сенсора ОЕСТ від швидкості переміщення щупа відносно імітатора поверхні з наскрізним дефектом порядку  $10^{-4}$  м<sup>3</sup> Па/с при швидкості витікання повітря зі щільного сопла щупа 30 м/с (температура  $20 \pm 1$  °С)

точки зору аеродинаміки) умови для транспортування аналіту від наскрізного дефекта до сенсора.

Створюючи навколо щупа амоніаквмісну атмосферу, було досліджено, чи достатня ця швидкість витікання повітря зі щільного сопла щупа щоб забезпечити утворення надійного газового екрану й, як наслідок, унеможливити зв'язок хімічного сенсора з атмосферою. Результати дослідів засвідчили, що 30 м/с – цілком достатня швидкість витікання повітря зі щільного сопла, при якій сенсор надійно захищений від впливу небажаних складових атмосфери.

На рис. 6 представлено залежність величини інтегрального відгуку хімічного сенсора ОЕСТ від швидкості еквідистантного (на відстані 1 мм) переміщення щупа відносно імітатора поверхні з наскрізним дефектом порядку  $10^{-4}$  м<sup>3</sup> Па/с як джерелом амоніаку при оптимальній швидкості витікання повітря зі щільного сопла (30 м/с).

Як видно з рис. 6, наскрізний дефект як джерело витоку амоніаку порядку  $10^{-4}$  м<sup>3</sup> Па/с надійно виявляється при швидкостях переміщення щупа ОЕСТ до 25 мм/с.

## Висновки

Використання хімічного сенсора на основі ІБ-КЗС та кольорової веб-камери моделі А4ТЕСН

РК-730 МІ як складових ОЕСТ дозволяє надійно детектувати витоки амоніаку в концентраційному діапазоні від 1 до 10 ppm. Після взаємодії з амоніаком таких концентрацій сенсор швидко (протягом декількох секунд) релаксує до початкового стану. При впливі на сенсор амоніаку більших концентрацій час повної релаксації сенсора істотно збільшується.

Застосування в складі ОЕСТ безконтактного щупа зі струминною завісою дозволяє за рахунок виникнення певних аеродинамічних ефектів унеможливити зв'язок хімічного сенсора з атмосферою, забезпечити регульоване за швидкістю транспортування аналіту від наскрізного дефекту конструкції до хімічного сенсора та пришвидшити релаксацію сенсора до початкового стану.

Роботу виконано за фінансової підтримки комплексної науково-технічної програми НАН України «Сенсорні прилади для медико-екологічних та промислово-технологічних потреб: метрологічне забезпечення та дослідна експлуатація».

## Список літератури

1. Шмидт Д., Шварц В. (1991) *Оптоэлектронные сенсорные системы*. Пер. с нем. Москва, Мир.
2. Бударин Л. И., Касаев К. С., Наумов В. Н. (1991) *Химические методы испытаний изделий на герметичность*. Киев, Наукова думка.
3. Дьяконов В. П., Абраменкова И. В. (2002) *MATLAB. Обработка сигналов и изображений. Специальный справочник*. С.-Пб., Питер.
4. Пиккеринг У. Ф. (1977) *Современная аналитическая химия*. Москва, Химия.
5. (1976) *Индикаторы*. Бишоп Э. (ред.). Москва, Мир.
6. ГОСТ 29298-2005 *Ткани хлопчатобумажные и смешанные бытовые. Общие технические условия*.
7. ТУ У 20.5-05417213-005:2017 *Хімічний оптичний сенсор на аміни*.
8. Хоруженко В. Ю., Вахула О. А., Костюкевич К. В., Кукла О. Л., Самойлова І. О., Христосенко Р. В. (2008) *Колориметричний детектор для аналізу компонентів газових і рідких сумішей*. Україна. Пат. № 84899.
9. Шульженко О. В., Манорик П. А., Посипайко Ю. М., Погоріла Л. М. (2013) *Струминний безконтактний щуп течіоукача*. Україна Пат. № 102457.

## References

1. Shmidt, D., Shvarts, V. (1991) *Optoelectronic sensor systems*. Moscow, Mir [in Russian].
2. Budarin, L.I., Kasaev, K.S., Naumov, V.N. (1991) *Chemical methods of leak testing of products*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
3. Dyakonov, V.P., Abramenkova, I.V. (2002) *MATLAB. Processing of signals and images: Special Refer. book*. St.-Petersburg, Piter [in Russian].
4. Pikkering, U.F. (1977) *Modern analytical chemistry*. Moscow, Khimiya [in Russian].
5. (1976) *Indicators*. Ed. by E. Bishop. Moscow, Mir [in Russian].
6. GOST 29298-2005: *Fabrics cotton and mixed, domestic. General specification* [in Russian].
7. TU U 20.5-05417213-005:2017: *Chemical optical sensor for amines* [in Ukrainian].
8. Khoruzhenko, V.Yu., Vakhula, O.A., Kostyukovich, K.V. et al. (2008) *Colorimetric detector for analysis of gas and liquid mixture components*. Pat. 84899 Ukraine [in Ukrainian].
9. Shulzhenko, O.V., Manoryk, P.A., Posypayko, Yu.M., Pogorila, L.M. (2013) *Current contactless probe of leak detector*. Pat. 102457, Ukraine [in Ukrainian].

П. А. МАНОРИК<sup>1</sup>, А. В. ШУЛЬЖЕНКО<sup>1</sup>, А. Л. КУКЛА<sup>2</sup>,  
А. Н. ФЕДЧЕНКО<sup>2</sup>, Ю. Н. ПОСИПАЙКО<sup>3</sup>, В. Н. ГРЕБЕННИКОВ<sup>1</sup>, С. А. СОТНИК<sup>1</sup>

P.A. MANORIK<sup>1</sup>, O.V. SHULZHENKO<sup>1</sup>, O.L. KUKLA<sup>2</sup>, O.M. FEDCHENKO<sup>2</sup>, Yu.M.POSYPAIKO<sup>3</sup>, V.M.GREBENNIOV<sup>1</sup>, S.O.SOTNIK<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физической химии им. Писаржевского НАН Украины. 03028, г. Киев, просп. Науки, 31.

<sup>1</sup>L.V.Pisarzhevskii Institute of Physical Chemistry of the NAS of Ukraine, 31, Nauki Ave., 03028, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup>Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева НАН Украины. 03028, г. Киев, просп. Науки, 41.

<sup>2</sup>V.E.Lashkarev Institute of Semi-Conductor Physics of the NAS of Ukraine, 41 Nauki Ave., 03028, Kyiv, Ukraine

<sup>3</sup>ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>3</sup>E.O.Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazimir Malevich str., 03150, Kiev. E-mail: office@paton.kiev.ua

### ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ СЕНСОРНЫЙ ТЕЧЕИСКАТЕЛЬ ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ УТЕЧЕК АММИАКА

### OPTOELECTRONIC SENSOR LEAK DETECTOR FOR DETECTION OF AMMONIA LEAKS

Разработан портативный оптоэлектронный сенсорный течеискатель для детектирования утечек аммиака через сквозные дефекты промышленных объектов, химический сенсор и аэродинамическое устройство для транспортировки пробы анализа от дефекта к сенсору как составляющие прибора. Выявлено на основе анализа результатов исследований, что прибор способен надежно детектировать концентрации аммиака порядка 1 ppm, эффективно функционирует в диапазоне концентраций аммиака 1...10 ppm. Определены оптимальные условия, при которых целесообразно эксплуатировать прибор. Библиогр. 9, рис. 6.

A portable optoelectronic leak detector for detection of ammonia leaks through the through-thickness defects in industrial facilities, chemical sensor and aerodynamic device for transportation of analyte sample from the defect to the sensor, as the instrument component, were developed. Proceeding from analysis of research results, it was found that the instrument is capable of reliably detecting ammonia concentrations of the order of 1 ppm, and effectively functions in the range of ammonia concentrations of 1 – 10 ppm. Optimum conditions were determined, under which it is rational to operate the instrument. 9 References, 6 Figures.

Ключевые слова: оптоэлектронный сенсорный течеискатель, аммиак, утечка, детектирование

Keywords: optoelectronic sensor leak detector, ammonia, leaks, detection

Надійшла до редакції  
30.05.201

### СЕРТИФИКАТ

Компания ООО «ТМ. ВЕЛТЕК» получила на трехлетний период Сертификат одобрения производителя сварочных материалов в соответствии с VdTUV-Merkblatt Schweißtechnik 1153:2012.

В Сертификате отмечено, что компания ООО «ТМ. ВЕЛТЕК» предоставила неопровержимые доказательства соответствующего применения своих цеховых процедур по гарантированию качества производимых сварочных материалов. Инспекция была проведена представителем TÜV Rheinland Industrie Service GmbH.

Получение сертификата — еще один важный шаг по расширению поставок порошковых проволок отечественного производства на зарубежные рынки.



### Электроды ПАТОН™ сертифицированы для продажи в Европе

Опытным заводом ИЭС им. Е.О. Патона успешно завершен процесс сертификации сварочных электродов ПАТОН™ для рынка Европы.

Наличие сертификата CE юридически подтверждает тот факт, что качество, рабочие характеристики, экологичность и безопасность электродов ПАТОН™ соответствуют всем необходимым требованиям со стороны европейского рынка и предоставляет возможность Заводу беспрепятственно поставлять данную продукцию в 25 стран Единой Экономической Зоны, а также в страны, признающие европейскую сертификацию.

Получение сертификата CE — еще один важный этап реализации стратегии ОЗСО ИЭС им. Е.О. Патона по развитию бренда и расширению поставок высококачественных сварочных материалов отечественного производства на зарубежные рынки.



## ВОПРОСЫ ВИБРАЦИОННОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ

В. В. ВЕРЕНЕВ<sup>1</sup>, А. В. БАГЛАЙ<sup>2</sup>, С. В. БЕЛОДЕДЕНКО<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт черной металлургии НАН Украины им. З. И. Некрасова, 49107, г. Днепр, пл. Академика Стародубова, 1.  
E-mail: verenev0704@gmail.com

<sup>2</sup>ДП «Диамех-Украина», 61105, г. Харьков-105, ул. Киргизкая, 19, АКБ-1. E-mail: baglay@diamech.com.ua

<sup>3</sup>Национальная металлургическая академия Украины, 49600, г. Днепр, просп. Гагарина, 4. E-mail: sergeibelo@gmail.com

В работе показано, что при разработке системы диагностирования оборудования прокатной клети необходимо учитывать вибрационные процессы в переходных режимах работы и при установившемся процессе прокатки и холостого хода. При таком подходе существенно обогащается информационное поле для диагностических целей. Приведены примеры переходных и вибрационных процессов в оборудовании клетей. Библиогр. 5, табл. 1, рис. 4.

*Ключевые слова:* прокатный стан, оборудование, линия привода, переходные процессы, вибрация, диагностика

В последние два десятилетия расширяется применение средств и методов вибрационной диагностики роторных машин на прокатных станах. Станы различного типа и назначения работают в специфических условиях и при разных технологических режимах. Поэтому при внедрении известных диагностических систем необходимо учитывать конструктивные, технологические и режимные условия работы прокатного стана. Цель данной работы состоит в том, чтобы раскрыть некоторые аспекты, относящиеся к диагностированию оборудования прокатных станов.

В качестве примера рассмотрим типовой непрерывный широкополосный стан горячей прокатки (НШС г.п.) 1680. Стан состоит из последовательно расположенных пяти черновых и шести чистовых клетей. На стане прокатываются полосы толщинами 1,5...6,0 мм шириной 900...1500 мм. Исходная заготовка представляет собой сляб толщиной 140...110

мм. Каждая клеть включает два опорных и два рабочих вала, которые приводятся от электродвигателя через редуктор, шестеренную клеть и универсальные шпиндели (рис. 1). Режим работы каждой клети носит периодически повторяющийся характер и включает: *a* – захват полосы валками; *b* – установившийся процесс прокатки на постоянной скорости; *v* – выброс полосы из валков; *z* – холостой ход.

Рассмотрим более подробно первые два режима. Особенность процесса захвата полосы валками заключается в том, что он носит ударный характер нагружения, в результате которого во всем оборудовании клети и линии привода формируются затухающие колебательные процессы (рис. 2, 3) [1]. Длительность переходных процессов весьма незначительная (до 0,8...1,0 с), однако они обладают существенной информативностью. Это связано не только с быстрым нагружением, но и действием

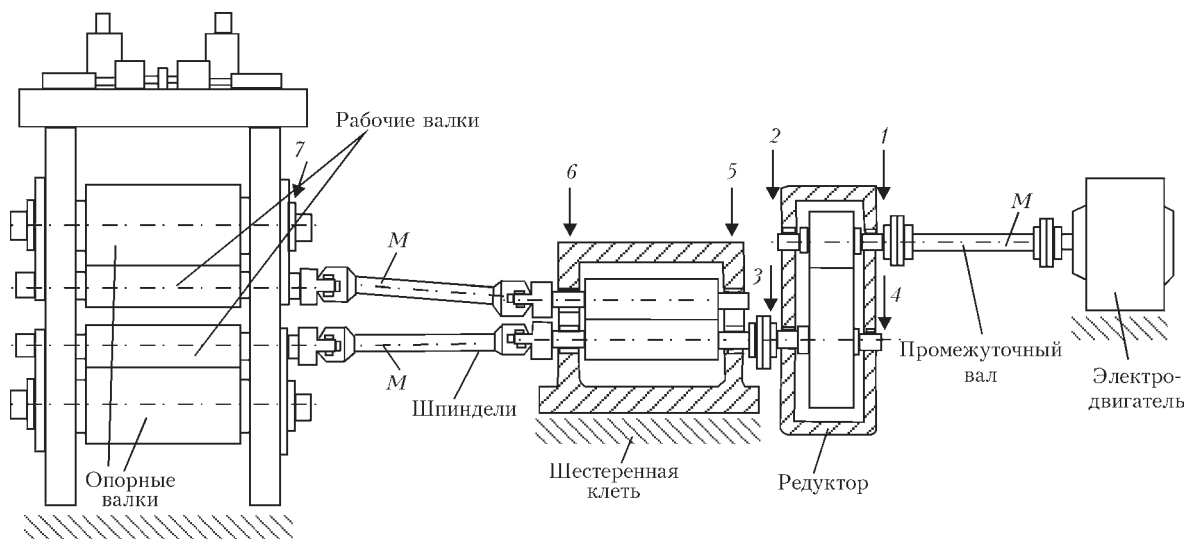


Рис. 1. Схема прокатной клети и линии привода валков (оси передач редуктора расположены в горизонтальной плоскости): М и ↓ – точки измерения момента и вибрации

© В. В. Веренев, А. В. Баглай, С. В. Белодеденко, 2018

**Возмущающие факторы, влияющие на вибродинамические процессы в двух режимах работы прокатной клети**

Режим захвата полосы валками		Установившийся режим	
1	Износ (зазоры) в сочленении «шпиндель-рабочий валок»	1	Поломка и износ зубчатых зацеплений
2	Износ (зазоры) в зубчатом зацеплении шестеренной клети редуктора	2	Поломка и износ в подшипниковых опорах валов шестеренной клети и редуктора
3	Износ подшипниковых опор	3	Поломки подшипников рабочих и опорных валков.
4	Зазор между опорами валков и станиной	4	Эксцентриситет бочки валков
5	Ослабление крепежных болтов шестеренной клети и редуктора	5	Биение шпинделей
Длительность колебаний до 0,8..1,0 с		6	Разнотолщинность полосы.
			Длительность колебаний 10...30 с и более

ряда сопутствующих возмущающих факторов, связанных с износом оборудования (таблица).

Так, в крутильной системе главного привода коэффициент динамичности  $K$  достигает значений 3,5...5,0 при развитом износе бронзовых вкладышей универсальных шпинделей и 1,8...2,5 при новых вкладышах [1]. Подобные систематические перегрузки, несмотря на кратковременное действие, отрицательно сказываются на ресурсе работы оборудования [2]. Поэтому одна из важных задач состоит в определении текущего технического состояния (износа, зазоров) шпиндельного сочленения. В настоящее время они непосредственно во время работы стана не измеряются. Замену шпинделей производят по результатам замеров износа бронзовых вкладышей во время остановки стана в связи с

перевалкой рабочих валков или согласно плановым ремонтным срокам, определяемым на основе опыта эксплуатации.

Частота и амплитуда колебаний оборудования в переходный период зависят также от износа зубчатых зацеплений шестеренной клети, редуктора и муфт, от зазоров в подшипниковых опорах и между подушками валков и станиной клети.

На основании опытно-промышленных экспериментальных измерений на шести НШС г. п. и

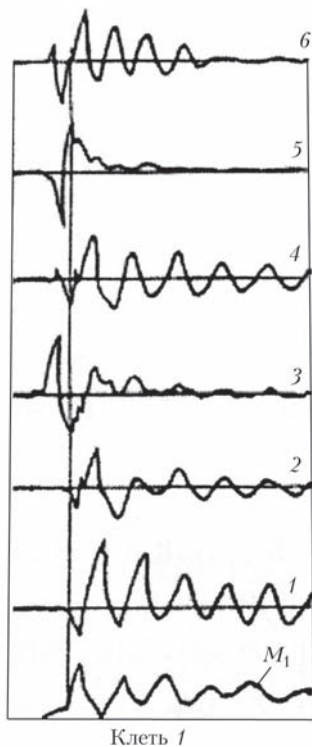


Рис. 2. Момент  $M_1$  сил упругости на промежуточном валу между двигателем и редуктором и вибрация корпуса шестеренной клети и редуктора: 1, 2 – опоры быстроходного вала; 3, 4 – опоры; 5, 6 – опоры шестеренных валков. Клеть № 1 стана 1680

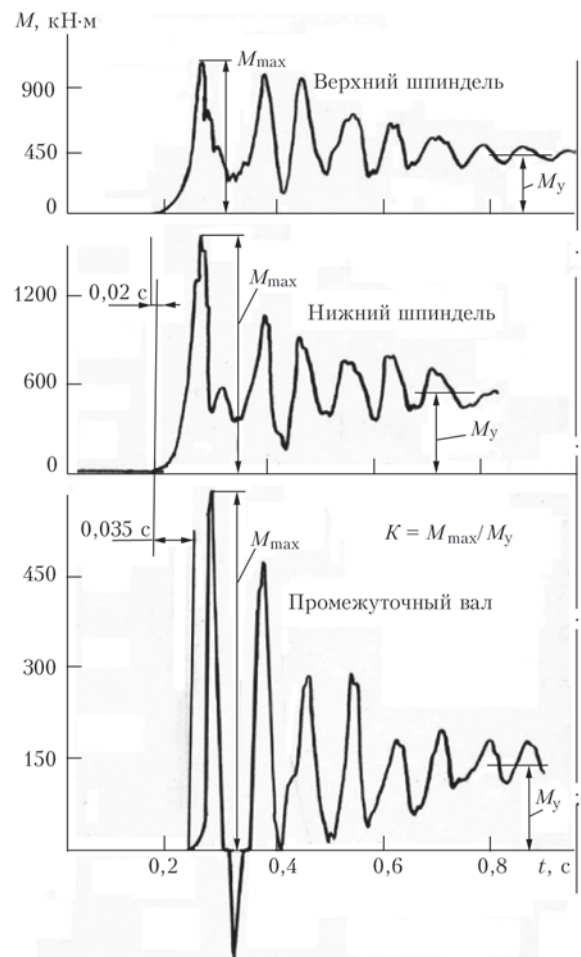


Рис. 3. Переходной процесс по моменту сил упругости на шпинделях и промежуточном валу при захвате полосы валками. Клеть № 5 стана 1700

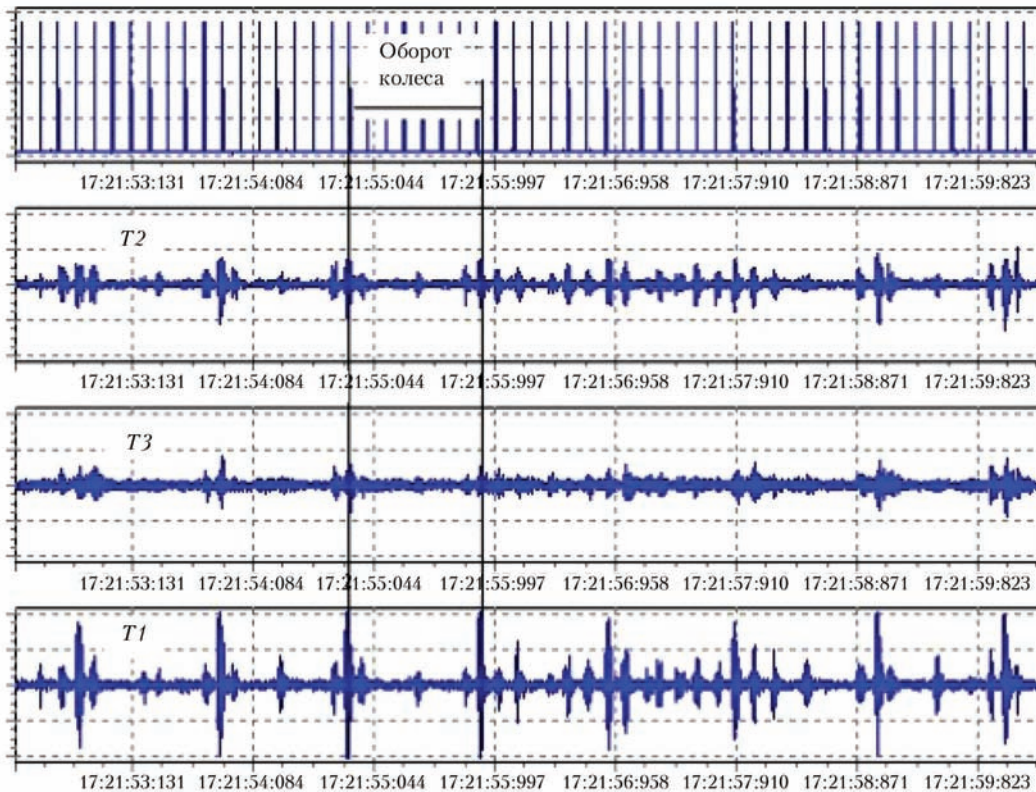


Рис. 4. Характер вибраций в точках 1, 2 и 3 (рис. 1) во время холостого хода при наличии дефекта в т. 1

математического моделирования установлен ряд особенностей переходных процессов [1].

1. Чем больше износ и угловой зазор в шпindelном сочленении, тем больше коэффициент динамичности в линии привода.

2. В процессе эксплуатации клетей вид колебаний момента на валу между двигателем и редуктором существенно изменяется от типового затухающего осциллятора до появления обратных ударов после одного-двух пиков колебаний (рис. 3) при уменьшении их частоты.

3. Наблюдается взаимосвязь момента и вибрации корпусного оборудования вдоль линии привода (рис. 2). Она состоит в том, что при хорошем (начальном) состоянии оборудования низшая частота крутильных колебаний четко проявляется в вибрации, а при увеличении износа, например, подшипниковых опор редуктора, проявляется высокочастотная составляющая.

4. Происходит запаздывание реакции участков линии привода на ударное приложение нагрузки к валкам тем большее, чем больше износ в сочленениях (рис. 3).

5. С увеличением износа опорных подушек валков увеличиваются удары между подушкой и станиной [3].

В работе [4] показано каким образом параметры переходных процессов, обусловленные захватом полосы валками, используются в диагностических целях.

Установившийся режим прокатки длится 10...30 с и более в зависимости от типа стана. В отличие от

режима захвата здесь действуют другие возмущения со стороны оборудования (таблица). Характер их вибрационного проявления во многом идентичен тем, которые изучены для роторных машин. Например, приведенный на рис. 4 вид существенного ударного вибрационного процесса в т. 1 редуктора, где имелся дефект в подшипнике, близок к известным примерам из публикации [5]. Поэтому для режимов работы с нагрузкой и без нагрузки приемлемы известные и опробованные способы и методы диагностирования при постоянной частоте вращения механизма.

Клетки широкополосных станов по конструктивному решению идентичны и отличаются величиной передаточного отношения редуктора. Частота вращения валков от клетки к клетке увеличивается. Особенность технологического режима состоит в том, что захват полосы валками осуществляется на скорости холостого хода при небольшом (0,5 %) падении ее после нагружения линии привода. Существенное значение для прокатных станов имеет то, что путем сравнения вибрационных процессов в идентичных точках оборудования одной клетки, а также между клетями в режимах работы под нагрузкой и без нагрузки повышается достоверность диагностических выводов.

В результате представленных материалов приходим на первый взгляд к тривиальному выводу – вибрационные процессы в идентичных точках оборудования в переходном и установившемся режимах существенно отличаются. Однако вместе с этим существенно отличаются и возмущающие

факторы. Последние, в свою очередь, тесно связаны с техническим состоянием оборудования. Рассмотренные режимы в информативном отношении (в части вибрации) дополняют и обогащают друг друга. Например, в режиме *б* задача определения зазора в шпиндельном сочленении не решается, однако решается в режиме *а*; не решается в режиме *а* задача определения поломки зуба в зацеплениях, но решается в режимах *б* и *г*.

Диагностической информацией обладают также режимы выброса полосы из валков и не отмеченные в таблице: разгон и торможение стана, прокатка сварных соединений, взаимодействие смежных клетей через прокатываемую полосу, когда в первой клетке наступает установившийся режим прокатки, а в следующей происходит захват полосы валками. Учет этих режимов существенно наполняет вибрационную информацию о состоянии оборудования и технологии прокатки и повышает эффективность применения систем диагностики.

### Выводы

1. Вибрационные процессы в оборудовании прокатных станов существенно различаются при захвате полосы валками и в режиме прокатки в части информативности о состоянии оборудования.

2. При разработке систем вибрационной диагностики, предназначенных для прокатных станов, учет не только режимов захвата и прокатки, но и таких, как выброс полосы из валков, взаимодействие клетей, разгон и торможение стана, прокатка сварных соединений позволяет полностью использовать в диагностических целях все информационное богатство вибрационных сигналов.

3. Дополнительно требуется разработка способов, методов и алгоритмов диагностирования и распознавания технического состояния оборудования по параметрам переходных процессов, некоторые из которых изложены в работе [4].

### Список литературы

1. Веренев В. В. (2014) *Снижение динамических нагрузок и диагностика широкополосных станов в переходных режимах*. Никополь, СПД Фельдман О.О.
2. Гребеник В. М., Цапко В. К. (1989) *Надежность металлургического оборудования (оценка эксплуатационной надежности и долговечности)*. Справочник. Москва, Металлургия.
3. Усуги Т., Каяси К. (2005) Устройство для демпфирования горизонтальных ударных нагрузок и вибрации клетки на стане горячей прокатки. *Бюлл. «Черная металлургия»*, **6**, 52–55.
4. Веренев В. В., Большаков В. И., Путники А. Ю. и др. (2007) *Диагностика и динамика прокатных станов*. Днепропетровск, ИМА-пресс.
5. Генкин М. Д., Соколова А. Г. (1987) *Виброакустическая диагностика машин и механизмов*. Москва, Машиностроение.

### References

1. Verenev, V.V. (2014) *Lowering of dynamic loads and diagnostics of wide-plate mills in transition modes*. Nikopol, SPD Feldman [in Russian].
2. Grebenik, V.M., Tsapko, V.K. (1989) *Reliability of metallurgical equipment (assessment of operational reliability and fatigue life): Refer. book*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
3. Usugi, T., Kayasi, K. (2005) Device for damping horizontal shock loads and stand vibration in a hot rolling mill. *Bull. Chyorn. Metallurgiya*, **6**, 52-55 [in Russian].
4. Verenev, V.V., Bolshakov, V.I., Putniki, A.Yu. et al. (2007) *Diagnostics and dynamics of rolling mills*. Dnepropetrovsk, IMA-press [in Russian].
5. Genkin, M.D. (1987) *Vibroacoustic diagnostics of machines and mechanisms*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].

В. В. ВЕРЕНЕВ<sup>1</sup>, А. В. БАГЛАЙ<sup>2</sup>, С. В. БЕЛОДЕДЕНКО<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Інститут чорної металургії НАН України ім. З. І. Некрасова, 49107, м. Дніпро, пл. Академіка Стародубова, 1.

E-mail: verenev0704@gmail.com

<sup>2</sup>ДП «Діамех-Україна». 61105, м. Харків-105, вул. Киргизька, 19, АКБ-1. E-mail: baglay@diamech.com.ua

<sup>3</sup>Національна металургійна академія України. 49600, м. Дніпро, просп. Гагаріна, 4.

E-mail: sergeibelo@gmail.com

### ПИТАННЯ ВІБРАЦІЙНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ОБЛАДНАННЯ ПРОКАТНИХ СТАНІВ

В роботі показано, що при розробці системи діагностування обладнання прокатної кліти необхідно враховувати вібраційні процеси в перехідних режимах роботи і при сталому процесі прокатки і холостого ходу. При такому підході істотно збагачується інформаційне поле для діагностичних цілей. Наведені приклади перехідних і вібраційних процесів в обладнанні клітей. Бібліогр. 5, табл. 1, рис. 4.

Ключові слова: прокатний стан, обладнання, лінія приводу, перехідні процеси, вібрація, діагностика

### ISSUES OF VIBRATION DIAGNOSIS OF ROLLING MILL EQUIPMENT

V.V.VERENEV<sup>1</sup>, A.V.BAGLAI<sup>2</sup>, S.V.BELODEDENKO<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Z.I.Nekrasov Institute of Ferrous Metallurgy of the NAS of Ukraine, 1 Akademik Starodubov sq., 49107, Dnepr. E-mail: verenev0704@gmail.com

<sup>2</sup>SC «Diamekh-Ukraine», 19, Kyrgyzka str., Kharkiv, 61105, АКБ-1. E-mail: baglay@diamech.com.ua

<sup>3</sup>National Metallurgical Academy of Ukraine, 4 Gagarina Ave., 49600, Dnepr, Ukraine. e-mail: segeibelo@gmail.com

The study shows that vibration processes in transition operating modes and at the steady-state process of rolling and idle run of the mill should be taken into account at development of the system for diagnosis of rolling stand equipment. With such an approach, the information field for diagnostic purposes is significantly enriched. Examples of transition and vibration processes in the stand equipment are given. 5 References, 1 Table, 4 Figures.

Keywords: rolling mill, equipment, drive line, transition processes, vibration, diagnostics

Поступила в редакцію  
21.04.2018

## МОДЕЛЮВАННЯ МОЖЛИВОСТІ РОЗВИТКУ ТРИЩИНОПОДІБНИХ ДЕФЕКТІВ У ПОСУДИНАХ ТИСКУ З ДВОШАРОВИХ СТАЛЕЙ

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

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

Після закінчення нормативного терміну служби багато з відповідальних зварних конструкцій продовжують свою роботу, в зв'язку з чим виникає необхідність продовження їх експлуатації в безпечному режимі. Найбільш вразливим місцем з точки зору виникнення і поширення тріщиноподібних дефектів в елементах обладнання з біметалу є ділянка переходу від корозійностійкої до теплостійкої сталі. Оскільки емпіричні розрахунки, особливо в разі біметалу, не завжди здійсненні, виникає необхідність моделювання напружено-деформованого стану конструкції, що дає можливість спрогнозувати подальше зростання дефекту заданих розмірів при відомих робочих параметрах конструкції. Бібліогр.10, табл. 2, рис. 6.

*Ключові слова:* тріщиноподібні дефекти, моделювання напружено-деформованого стану, коефіцієнт інтенсивності напружень, двошарові сталі

Нормативний термін експлуатації багатьох зварних посудин тиску у нафтопереробній галузі добігає кінця. Але тим не менше значна частина з них залишається в дії у зв'язку з чим викає необхідність безпечного продовження їх експлуатації. При цьому постає проблема визначення довговічності конструкцій, що можливо лише на основі прийнятих нормативних підходів, які передбачають неперервний моніторинг з використанням сучасних засобів технічної діагностики. Аналіз результатів регламентованих обстежень свідчить про те, що під час експлуатації технологічного устаткування, виготовленого з низьковуглецевих і низьколегованих сталей, може з'являтися граничний стан, пов'язаний з утворенням місцевих об'ємних дефектів, наявність яких не завжди призводить до необхідності припинення функціонування об'єкта і зняття його з експлуатації [1–7]. Проте існує ряд дефектів таких, як шарувате розтріскування внаслідок концентрації водню в обмеженому замкнутому об'ємі стінки об'єкта, яке може призвести до відмов конструкції при певних робочих параметрах [4–6]. Об'єднання відокремлених несучільностей в шари в поєднанні з наявністю об'ємних дефектів свідчить про те, що суттєву роль в корозійних процесах відіграє структура металу [3]. Так, інтенсивне кородування у вигляді виразкової та щільової корозії розвивається пошарово у зв'язку з яскраво вираженою структурною текстурою, що вказує на суттєву роль корозійної анізотропії металу. При цьому найбільш уразливими ділянками є різні зони зварного з'єднання, в першу чергу, лінія сплавлення, а також елементи обладнання з двошарової сталі – біметалу, зокрема ділянка переходу від

корозійностійкої до теплостійкої сталі. Розтріскування корозійностійкого шару в процесі експлуатації може спровокувати втрату герметичності посудини тиску, підтікання продукту під плакуючий шар, що в подальшому може призвести до втрати герметичності конструкції. При цьому наявність біметалевої структури робить неможливими емпіричні прогнози властивостей матеріалів [6, 7]. За таких обставин виникає необхідність моделювання технічного стану конструкції, що дає можливість спрогнозувати подальший ріст дефекту заданих розмірів при відомих робочих параметрах.

**Аналіз умов виникнення дефектів у плакуючому шарі стінок посудин тиску.** Слід підкреслити, що корпуси відповідального обладнання, яке використовується в нафтопереробній промисловості, зокрема реакторів, колон, теплообмінників і т. і., виготовляють або цілком з високолегованих сталей, або, як зазначалось, з біметалу, де несучий шар зазвичай хромомолібденова сталь (типу 15ХМ), а плакуючий (захисний) – нержавіюча сталь (типу 08Х18Н10Т). Основною перевагою, коли корпус і денця виготовляють з двошарової сталі, є те, що відпадає необхідність в захисній футеровці. Однак підвищена небезпека роботи обладнання в процесах переробки нафти полягає в тому, що в результаті тривалого впливу водню при підвищених температурах і тисках на стінки корпусу може статися його проникнення через плакуючий шар в основний, що несе загрозу зневуглюцювання, зниження пластичності і тривалої міцності біметалу.

Для детального дослідження умов виникнення дефектів та прогнозування подальшого зростання тріщини в основний метал в посудинах,

що працюють під тиском, було обрано фрагмент хімічного реактора об'ємом понад 40 м<sup>3</sup>, який перебував в постійній експлуатації більше 35 років за робочого тиску близько 3,0 МПа і температури дещо вище 400 °С. Робоче середовище – водневовмісний газ (близько 70 % водню і до 0,01 % сірководню). Корпус посудини виконано з двошарової сталі – теплостійкої 15ХМ (несучий шар) і корозійностійкої 08Х18Н10Т (плакуючий шар). Товщина стінки посудини складає біля 50 мм. За допомогою візуально-оптичного способу, а також капілярної дефектоскопії з внутрішньої сторони посудини було виявлено: протяжні тріщини по краях зварних з'єднань; сітка тріщин; одиничні пори і скупчення пор. Виникнення подібних дефектів – є результат тривалого впливу водню при підвищених температурах і тиску в корпусі, в зв'язку з чим може відбутися його проникнення через плакуючий шар в основний. До речі воднева корозія не виявляється при звичайному візуальному огляді. Для її виявлення необхідна вирізка з апаратів зразків з подальшим дослідженням структури і механічних властивостей металу. Проникаючи в сталь, водень викликає її знеуглецювання, зниження пластичності і тривалої міцності. Інтенсивність водневої корозії залежить від складу сталі, температури і парціального тиску водню.

Згідно з вимогами нормативного документа [8] з боку внутрішньої поверхні з верхньої і нижньої частини посудини було вирізано ненаскрізні темплети, які мали форму конуса висотою 10 мм з діаметром основи 15 мм. При первинному огляді шліфів виявлено, що поверхня основи конуса уражена павутиноподібною сіткою тріщин.

**Дослідження структури металу в непошкодженій і пошкодженій частинах посудини.** Для

подальшого вивчення мікроструктури оболонки посудини конічний зразок було розрізано перпендикулярно до основи. Як довели дослідження перерізу товщини стінки, у місцях, не уражених корозією, структура металу являє собою «листяний піріг», що складається з трьох шарів: плакуючого, перехідного і несучого (рис. 1).

Плакуючому шару притаманна типова для нержавіючих сталей аустенітна структура з ГЦК-решіткою (верхня частина рис. 1, а). Крім того, у всьому обсязі аустенітних зерен мають місце численні нітриди (рис. 2, а), які розташовані як у тілі зерна, так і по межах аустенітних зерен. При цьому, як показав мікрорентгеноспектральний аналіз (МРА), вміст титану в нітриді, що на межах зерен, в два рази перевищує його вміст в нітриді, що в тілі зерна. Мікротвердість *HV* цього шару складає 221, а поблизу перехідного шару досягає величини 245. В деяких місцях спостерігається наявність тріщин, переважно міжкристалічного походження (рис. 2, б, в). На границях, де пройшла міжкристалічна корозія, спостерігається підвищений вміст хрому і, особливо, сірки (в 40...50 разів), та знижений вміст нікелю (табл. 1).

Для несучого шару характерна типова феритно-перлітна структура хромомолібденової сталі з ОЦК-решіткою, у якій не виявлено будь-яких пошкоджень (нижня частина рис. 1, а). Мікротвердість *HV* цього шару становить величину порядку 128...170.

У вузькій смужці перехідного шару сегрегація домішок по межах аустенітних зерен з боку плакуючого шару виражена більшою мірою, ніж з боку несучого шару з феритно-перлітною структурою (рис. 1, а). Також спостерігаються сліди дрібних тріщин і пор, які чітко виявляються в

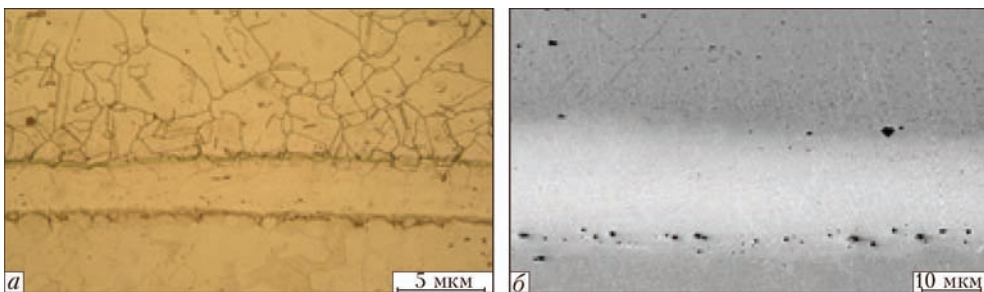


Рис. 1. Структура металу плакуючого шару «листяний піріг»: з оптичного мікроскопу – а; в ОЖС – б

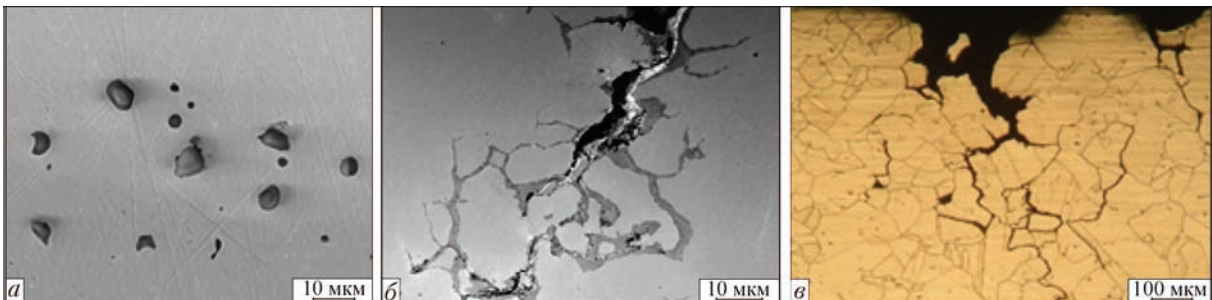


Рис. 2. МКК в плакуючому шарі: нітриди (а) та загальний вигляд дефекту (б), одержані за допомогою ОЖС: зображення дефекту через оптичний мікроскоп (в)



Таблиця 1. Вміст елементів в тілі непошкодженого зерна і на «роз'їдених» границі, мас. %

Місце дослідження	C	Ti	Cr	Ni	Fe	S
Тіло зерна	0,55	0,11...0,13	18,1...19,2	9,2...9,8	71,2...72,3	0,5...0,7
Ушкоджена границя	-	0,21...0,26	28,5...36,6	1,05...2,12	18,8...20,5	21,0...34,0

Оже-електронному спектрі (ОЖС) (рис. 1, б). У перехідному шарі мікротвердість  $HV$  становить 201...206, а в області нітридів – 227...243.

З точки зору стійкості металу по відношенню до водневовмісного середовища особливого значення набуває вуглець, пов'язаний в карбіди. При цьому до визначальних факторів, слід віднести: стехіометричний склад, морфологію і розподіл карбідних частинок. З іншого боку на схильність до карбідоутворення істотно впливає легування нержавіючих сталей. Як відомо, ванадій, вольфрам, молібден, марганець і ніобій знижують активність вуглецю, запобігаючи можливості виникнення міжкристалічної корозії (МКК). Кремній, кобальт, і нікель – навпаки, збільшують активність атомів вуглецю, посилюючи МКК.

Карбіди зазвичай концентруються біля границь зерен, утворюючи суцільний ланцюжок. Так, в корозійностійких сталях показником схильності до міжкристалічної корозії служить наявність на границях зерен складних карбідів типу  $Me_{23}C_6$ , збагачених хромом, що свідчить про виникнення дефіциту хрому в твердому розчині приграничних областей. При впливі агресивного середовища карбіди хрому розчиняються. Чим більше різниця концентрацій хрому на границях зерна і в об'ємі, тим швидше протікає міжкристалічна корозія. При цьому існує вірогідність, що корозійне розтріскування, яке було виявлено лише в плакуючому шарі, може прорости у несучий шар. У зв'язку з цим було оцінено за допомогою математичного моделювання можливість проростання тріщини в основний метал.

Для оцінки ймовірності росту тріщин в плакуючому шарі проведено, як згадувалось, аналіз розподілу елементів, що входять до складу сталі, як пошкоджених, так і непошкоджених ділянок, прилеглих до тріщини (табл.1). Були вибрані типові ділянки з тріщинами з верхньої та нижньої частини посудини. З метою отримання топографії поверхні, а також якісного і кількісного аналізу складу границь зерен було використано ОЖС з локальністю  $\sim 50$  нм. Перед завантаженням зразка в робочий контейнер мікрошліф піддавався промиванню спиртом і гексаном з використанням ультразвукового очищення. Як можна бачити, перш за все звертає на себе увагу відсутність вуглецю, що обумовлено, як зазначалося, проникненням водню. На границі зерна більше ніж у три рази знижується вміст заліза, у вісім разів нікелю, майже в два рази збільшується вміст хрому і приблиз-

но в 40...50 разів збільшується кількість сірки (табл. 1).

Таким чином, в обсязі «здорового» зерна елементний склад металу практично відповідає складу сталі 0X18H10T. В міру наближення до області, охопленої корозією, розподіл елементів набуває нестабільного характеру.

На глибині, де швидкість просування корозійної тріщини сповільнюється, спостерігається деяке вирівнювання в розподілі між тілом і границею зерна як заліза, так хрому і нікелю, що стає ще більш помітним під час майбутньої зупинки міжкристалічної тріщини. Результати ОЖС добре узгоджуються з даними МРА.

Металографічний аналіз поздовжнього перерізу конічних темплетів показав, що тріщини в основному металі не пов'язані зі зварним з'єднанням і притупляються на глибині менше 1,5 мм від поверхні у верхній частині апарату і менше 2 мм в нижній частині апарату. Слід зазначити, що метал нижньої частини посудини має більш тонку будову в порівнянні з верхньою частиною, що, ймовірно, також може відбитися на опорі руйнуванню, в тому числі і міжкристалічній корозії (табл. 2).

Таким чином, плакуючому шару властива характерна для нержавіючих сталей грубозерниста структура з балом зерна аустеніту 1-2 для верху і 1-4 для низу апарату. У той же час несучий шар являє собою більш тонку структуру з феритно-перлітною складовою з балом зерна фериту 5-7. Наглядно підтверджено, що аустенітна структура завдяки великому розміру зерна, а також процесам, що відбуваються на границях зерен, схильна до утворення міжкристалічної корозії, яка пов'язана зі збідненням приграничних областей зерен атомами хрому і одночасним утворенням на границях зерен карбідів хрому у вигляді  $Cr_{23}C_6$ . Карбіди виступають в ролі анода, через що відбувається різке збільшення швидкості міжкристалічної корозії. При підвищеній температурі атоми вуглецю, які набагато менші атомів хрому і мають більшу рухливість, дифундують до границь зерен не тільки з прикордонних зон, але й з об'єму. При цьому в карбідоутворенні бере участь майже весь

Таблиця 2. Параметри структури металу реактора

Місце дослідження	Бал зерна за ГОСТ 5639-82	
	Верх	Низ
Плакуючий шар	1-2	1-4
Несучий шар	5-6	6-7

вуглець зерна, а щодо атомів хрому, то тільки ті, які розташовані майже біля самих його границь. Таким чином, як відзначалось, карбіди концентруються біля границь зерен, утворюючи суцільний ланцюжок, а прикордонні області виявляються збіднені хромом. При впливі агресивного середовища карбіди хрому розчиняються. Про швидкість міжкристалічної корозії нержавіючих сплавів можна судити по концентрації в зерні атомів хрому. Чим більша різниця концентрації хрому на границях зерна, тим швидше протікає міжкристалічна корозія.

На протікання міжкристалічної корозії при дії сильних окиснювачів великий вплив робить не один, а кілька факторів одночасно (інтенсивне розчинення надлишкових фаз, нестійких в даному середовищі; вплив хромат-іонів; вибіркоче розчинення границь зерен, збіднених хромом; вибіркоче розчинення місць концентрації домішок т. і.). При цьому розтріскування границь по типу міжкристалічної корозії, зумовленої як перепадом концентрацій елементів заміщення (хром, нікель, титан), так і зневуглецюванням, призводить до заповнення їх сіркою, що може призвести до подальшого розвитку сірководневого розтріскування.

Необхідно підкреслити, що в цілому, незважаючи на розгалужену павутиноподібну сітку тріщин на внутрішній поверхні апарату, в місцях, віддалених від зварних швів, розвиток тріщин з плакуючого шару (сталь 0X18H10T) як у верхній, так і в нижній частині посудини не поширюється до перехідного шару (сталь 15XM), зупиняючись на глибині не більше 2 мм.

**Оцінка поширення тріщиноподібного дефекту в плакуючому шарі хімічного реактора на основі критерію лінійної механіки руйнування.** Для подальшої оцінки ймовірності росту тріщин в плакуючому шарі використано метод порівняння допустимого значення тріщиностійкості плакуючого матеріалу ( $K_{IC}$ ) з розрахунковим значенням коефіцієнта інтенсивності напружень  $K_I$ . Наводиться значення допустимої тріщиностійкості для матеріалу плакуючого шару, в якості якого застосована сталь 08X18H10T. Розрахункове значення коефіцієнта інтенсивності напружень отримано шляхом математичного моделювання напівеліптичної тріщини з максимальними лінійними розмірами методом кінцевих елементів. Завдання вирішувалося шляхом масштабування – переходу від повномасштабної геометричної моделі посудини до невеликої «проблемної» ділянки конструкції із напівеліптичною тріщиною. До гео-

метричної моделі, розбитої на кінцеві елементи, включені граничні умови у вигляді робочих параметрів – робочий тиск і температура.

В результаті розрахунку отримано розподіл напружень і пружних деформацій, а також значення коефіцієнта інтенсивності напружень в околі заданої напівеліптичної тріщини при дії робочих параметрів навантаження на конструкцію. Порівнявши розрахункові значення  $K_I$  з допустимим  $K_{IC}$  для даної сталі зроблено висновок про те, що тріщина в плакуючому шарі не має схильності до зростання.

Для встановлення ймовірності поширення тріщини із плакуючого в несучий шар посудини при робочих навантаженнях було використано метод скінченних елементів, який складався з декількох етапів:

1. *Побудова геометричної моделі.* Геометрична модель посудини побудована у програмному модулі і складається з таких основних елементів: нижнього та верхнього денця, обичайок корпуса, опорного кільця, опорної спідниці, двох патрубків Ду100, одного патрубка Ду200, одного патрубка Ду350 та одного Ду500.

2. *Генерування сітки для повної моделі.* Модель розбивається на сітку скінченних елементів в автоматичному режимі з параметром «величини комірки» 20 мм таким чином, щоб по товщині стінки припадало щонайменше 2 елемента тетраедальної форми

3. *Граничні умови.* Граничними умовами для моделі виступають робочі параметри: температура 420 °С і внутрішній тиск 2,9 МПа. Для вирішення теплової задачі, окрім внутрішньої поверхні посудини, що навантажена температурою, усі зовнішні поверхні задіяні в конвективному теплообміні з навколишнім середовищем. Обмеження ступенів свободи моделі відбувалось за рахунок

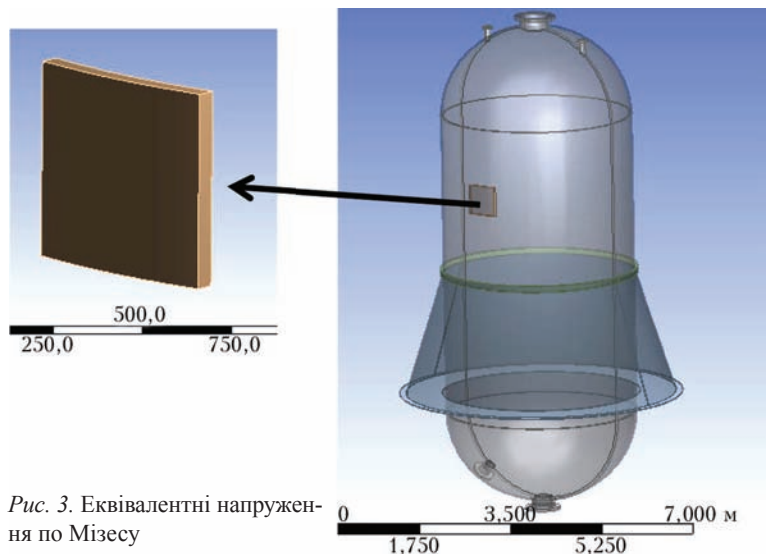


Рис. 3. Еквівалентні напруження по Мізесу

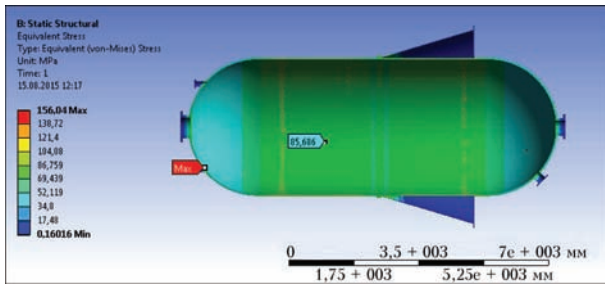


Рис. 4. Вирізана частина підмоделі

закріплення опорної частини спідниці по трьох координатах.

4. *Розрахунок повної моделі для визначення локальних зон концентрації напружень.* Для аналізу взято повні еквівалентні напруження по Мізесу, результати чого показані на рис. 3. Як видно з рисунка, напруження в основній частині посудини знаходяться в межах 85 МПа, а пікові значення припадають на ділянки зварювання патрубків. Всі значення напружень знаходяться в допустимих межах, тобто конструкція працює в пружній області, напруження не перевищують границі текучості  $\sigma_T = 245$  МПа для даної сталі при заданій температурі.

5. *Створення підмоделі на основі моделі і генерування сітки для підмоделі* (рис. 4). Після визначення зон з високою концентрацією напружень в межах зони розтріскування можна перейти до створення підмоделі на базі цієї моделі. Для цього модель ріжеться на частини, а потім непотрібні фрагменти моделі просто пригнічуються. При пригніченні частин моделі автоматично зберігається геометрична зв'язаність об'єктів, тобто пригнічені тіла не змінюють свого положення відносно глобальної системи координат. Для передачі (інтерполяції) переміщень з повної моделі в підмодель необхідно задати вибірки геометричних об'єктів (Named Selection) в місцях сполучення підмоделі з моделлю. На ці вибірки надалі будуть посилатися команди спеціального макросу.

6. *Інтерполяція граничних умов з повної моделі в підмодель, моделювання тріщиноподібного дефекту в підмоделі* (рис. 5). В підмодель за допомогою автоматичного макросу «тріщина» вноситься напівеліптична тріщина з геометричними параметрами, отриманими з вирізаних зразків. Тріщина орієнтована в поздовжньому (вздовж осі корпусу посудини) напрямку, як найбільш небезпечному. Довжина тріщини 20 мм і глибина 2 мм.

7. *Побудова сітки скінченних елементів в області тріщини та аналіз отриманих результатів.* Для оцінки можливості розповсюдження тріщини використовується коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН). КІН використовується у лінійній механіці руйнування для опису полів напружень поблизу вершини тріщини. На рис. 6 зображено розподіл КІН для тріщини. Допустимий КІН для

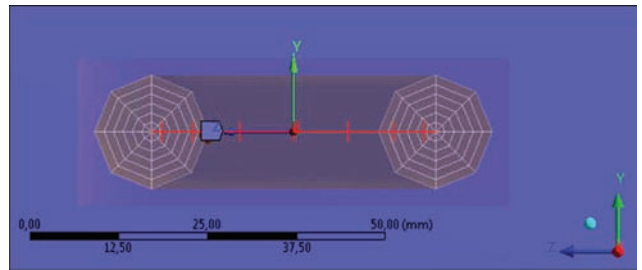


Рис. 5. Тріщиноподібний дефект в підмоделі

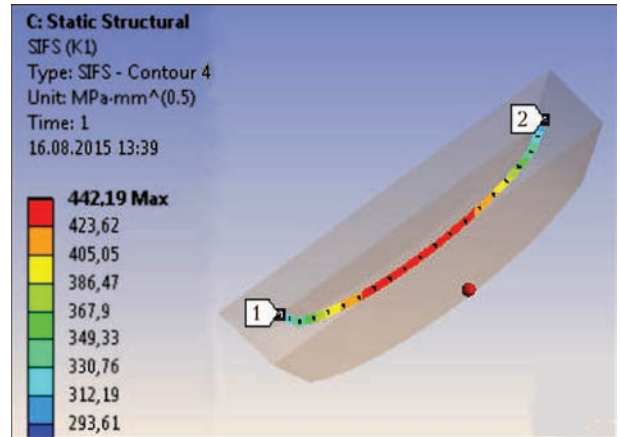


Рис. 6. Розподіл КІН для напівеліптичної тріщини

сталі плакуючого шару 08X18Н10Т згідно роботи [9] становить  $268 \text{ МПа} \cdot \text{мм}^{0.5}$ . Отриманий розподіл КІН складає  $442,19 \text{ МПа} \cdot \text{мм}^{0.5}$ , і це дорівнює  $13,98 \text{ МПа} \cdot \text{мм}^{0.5}$ , що майже в 20 разів менше допустимого значення. Отже робиться висновок, що тріщина проростати не буде.

Тим не менш в найбільш навантаженому місці апарату згідно з поширеною парадигмою програмного аналізу в плакуючому шарі посудини було змодельовано тріщину і досліджено можливість її подальшого росту.

Таким чином, в результаті розрахунку отримано розподіл напружень і пружних деформацій, а також значення коефіцієнта інтенсивності напружень в околі заданої напівеліптичної тріщини при дії робочих параметрів навантаження на конструкцію. Порівнявши розрахункові значення  $K_I$  з допустимим  $K_{IC}$  для даної сталі зроблено висновок про те, що досліджена тріщина в плакуючому шарі не має схильності до зростання. Тим не менш розтріскування є небажаним явищем, бо в процесі експлуатації може призвести до втрати герметичності посудини тиску та підтікання робочого продукту під плакуючий шар, що в свою чергу, може обумовити спонтанне поширення корозійних пошкоджень. Саме тому в роботі [10] запропоновано комплекс ремонтних заходів, які полягають у вибірці дефектної ділянки з подальшим отриманням наплавленого матеріалу методами ручного дугового зварювання, або механізованого зварювання порошковим дротом таким чином, щоб характеристики наплавленого матеріалу були

аналогічними характеристикам плакуючого шару. При цьому також рекомендовано знизити робочі параметри експлуатації даного обладнання.

**Список літератури**

1. Лобанов Л. М., Рабкина М. Д., Нетребский М. А., Мутас В. В. (2013) Закономерности развития эксплуатационных дефектов в сварных конструкциях нефтеперерабатывающего комплекса. Сб. мат. «Повышение надежности и долговечности оборудования нефтегазовой промышленности», Бердянск, сс. 97–102.
2. Гиренко В. С., Рабкина М. Д., Дядин В. П. и др. (1998) Некоторые результаты технической диагностики сосудов и трубопроводов в нефтехимической промышленности. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **3**, 17–24.
3. Гиренко В. С., Рабкина М. Д., Гиренко С. В. (2003) Физико-механические изменения в сталях при эксплуатации в водородосодержащих средах. *Там же*, **4**, 18–24.
4. Рабкина М. Д., Перепичай А. О., Перепичай І. І., Мутас В. В. (2017) Аналіз результатів технічного діагностування кожухотрубних теплообмінників для ранжування експлуатаційних дефектів та оцінки їх впливу на залишковий ресурс. *Там же*, **2**, 50–54.
5. Гиренко В. С., Мутас В. В., Гиренко С. В. (2001) Прочность трубопроводов и сосудов с коррозионными выемками. *Там же*, **4**, 21–23.
6. Рабкина М. Д. (2004) Результаты технического диагностирования печных змеевиков установок каталитического риформинга и гидроочистки нефтепродуктов. *Там же*, **2**, 9–17.
7. Рабкина М. Д. (2005) Оценка коррозионных поражений колонн ректификации и сероочистки углеводородных газов. *Там же*, **2**, 3–8.
8. НПАОП 0.00-6.09-10 (1.6, п.4.3.10) *Порядок проведения огляду, випробування та експертного обстеження обладнання установок гідрогенізаційних процесів у нафтопереробному, нафтохімічному виробництвах.*
9. ПНАЭ Г-7-002-86 *Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок.*
10. Ющенко К. А., Чекотило Л. В., Каховский Ю. Н. и др. Опыт ремонта корпусов колонного оборудования по переработке нефти из двухслойных сталей. Режим доступа: [http://www.kpi.kharkov.ua/archive/Наукова\\_періодика/vestnik/Хімія,%20хімічна%20технологія%20та%20екологія/2010/14/17.pdf](http://www.kpi.kharkov.ua/archive/Наукова_періодика/vestnik/Хімія,%20хімічна%20технологія%20та%20екологія/2010/14/17.pdf), С. 122–136.

**References**

1. Lobanov, L.M., Rabkina, M.D., Netrebsky, M.A., Mutas, V.V. (2013) Regularities of propagation of service defects in Welded structures of oil processing complex. In: *Improvement of reliability and fatigue life of equipment of oil and gas industry: Transact.* Berdyansk, 97-102 [in Russian].
2. Girenko, V.S., Rabkina, M.D., Dyadin, V.P. et al. (1998) Some results of technical disgnostics of vessels and pipelines in petrochemical industry. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **3**, 17-24 [in Russian].
3. Girenko, V.S., Rabkina, M.D., Girenko, S.V. (2003) Physico-mechanical changes in steels in service in hydrogen-containing media. *Ibid.*, **4**, 18-24 [in Russian].
4. Rabkina, M.D., Perepichay, A.O., Peremichay, I.I., Mutas, V.V. (2017) Analysis of results of technical diagnostics of shell-and-tube heat exchangers for ranking of service defects and evaluation of their effect on residual life. *Ibid.*, **2**, 50-54 [in Russian].
5. Girenko, V.S., Mutas, V.V., Girenko, S.V. (2001) Strength of pipelines and vessels with corrosion recesses. *Ibid.*, **4**, 21-23 [in Russian].
6. Rabkina, M.D. (2004) Results of technical diagnostics of furnace coils in installations of catalytic reforming. *Ibid.*, **2**, 9-17 [in Russian].
7. Rabkina, M.D. (2005) Evaluation of corrosion damage of columns for rectification and desulfurization of hydrocarbon gases. *Ibid.*, **2**, 3-8 [in Russian].

8. НПАОП 0.00-6/09-10 (1.6, item 4.3.10): *Procedure of inspection, testing and expert examination of equipment of hydrogenation process installations in oil processing and petrochemical productions* [in Russian].
9. PNAEG-7-002-86: *Norms of strength calculation of equipment and pipelines of nuclear power units* [in Russian].
10. Yushchenko, K.A., Chekotilo, L.V., Kakhovsky, Yu.N. et al. *Experience of repair of two-layer steel cases from of column equipment for oil processing.* <http://kpi.kharkov.ua/archive/2010/14/17.pdf>, 122-136 [in Ukrainian].

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

ІЗС ім. Е. О. Патона НАН України. 03150, г. Київ, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РАЗВИТИЯ ТРЕЩИНОПОДОБНЫХ ДЕФЕКТОВ В СОСУДАХ ДАВЛЕНИЯ ИЗ ДВУХСЛОЙНЫХ СТАЛЕЙ**

После окончания нормативного срока службы многие из ответственных сварных конструкций продолжают свою работу, в связи с чем возникает необходимость продления их эксплуатации в безопасном режиме. Наиболее уязвимым местом с точки зрения возникновения и распространения трещиноподобных дефектов в элементах оборудования из биметалла является участок перехода от коррозионностойкой к теплостойкой стали. Поскольку эмпирические расчеты, особенно в случае биметалла, не всегда осуществимы, возникает необходимость моделирования напряженно-деформированного состояния конструкции, что дает возможность спрогнозировать дальнейший рост дефекта заданных размеров при известных рабочих параметрах конструкции. Библиогр.10, табл. 2, рис. 6.

*Ключевые слова:* трещиноподобные дефекты; моделирование напряженно-деформированного состояния; коэффициент интенсивности напряжений; двухслойные стали

**MODELING THE POSSIBILITY OF PROPAGATION OF CRACKLIKE DEFECTS IN PRESSURE VESSELS FROM TWO-LAYER STEELS**

I. I. PEREPICHAJ, A. O. PEREPICHAJ, V. V. MUTAS, M. D. RABKINA

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

After the normative service life is over, many critical welded structures remain in service that necessitates the need to continue their safe operation. The most sensitive location from the view point of initiation and propagation of cracklike defects in bimetal elements of equipment is the area of transition from corrosion-resistant to heat-resistant steel. As empirical calculations, particularly in the case of a bimetal, cannot always be performed, there arises the need to model the stress-strain state of the structure, that enables prediction of further growth of the defect of specified dimensions with the known working parameters of the structure. 10 References, 2 Tables, 6 Figures.

*Keywords:* cracklike defects, modeling the stress-strain state, stress intensity factor, two-layer steels

Надійшла до редакції  
22.03.2018

# ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО ВДОСКОНАЛЕННЯ КЛАСИФІКАЦІЇ ВИХРОСТРУМОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

**В. М. УЧАНІН**

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); [vuchanin@gmail.com](mailto:vuchanin@gmail.com)

Запропоновано проект розширеної загальної класифікації конструкцій вихрострумівих перетворювачів. В запропоновану класифікацію, зокрема, вперше введені багатоеlementні вихрострумівих перетворювачі, які реалізують технологію електронного або комбінованого сканування поверхні об'єкта контролю, а також вихрострумівих перетворювачі дальнього поля. Подано приклади побудови конструкцій вихрострумівих перетворювачів, зокрема багатоеlementних вихрострумівих перетворювачів і вихрострумівих перетворювачів дальнього поля. Бібліогр. 26, рис. 7.

*Ключові слова:* вихрострумівий контроль, вихрострумівих перетворювачі, конструкція, класифікація

Конструкція і характеристики вихрострумівих перетворювачів (ВСП) мають вирішальне значення для забезпечення ефективного вихрострумівого контролю, тому обґрунтування оптимального вибору ВСП є чи не найважливішим етапом під час розробки нових засобів і технологій вихрострумівого контролю [1–14].

В попередніх роботах була запропонована розширена класифікація накладних ВСП [13, 14]. В ній були введені нові класи ВСП (зокрема, анаксіальні ВСП, ВСП подвійного диференціювання або мультидиференційні), які не були класифіковані у раніш-

ніх роботах [1–12]. В роботах [13, 14] також були подані приклади із науково-технічної літератури, які обґрунтовували введення нових класів ВСП.

Аналіз нових напрацювань з вихрострумівого методу показав, що існуюча загальна класифікація ВСП (не тільки накладних) також вже не відповідає сучасному стану розвитку методу. Сьогодні вже не можна нехтувати появою нових ВСП, зокрема багатоеlementних ВСП (array eddy current probe) або ВСП дальнього поля (remote field), які відсутні у будь яких відомих класифікаціях. Крім того, є випадки, коли використовувані терміни не

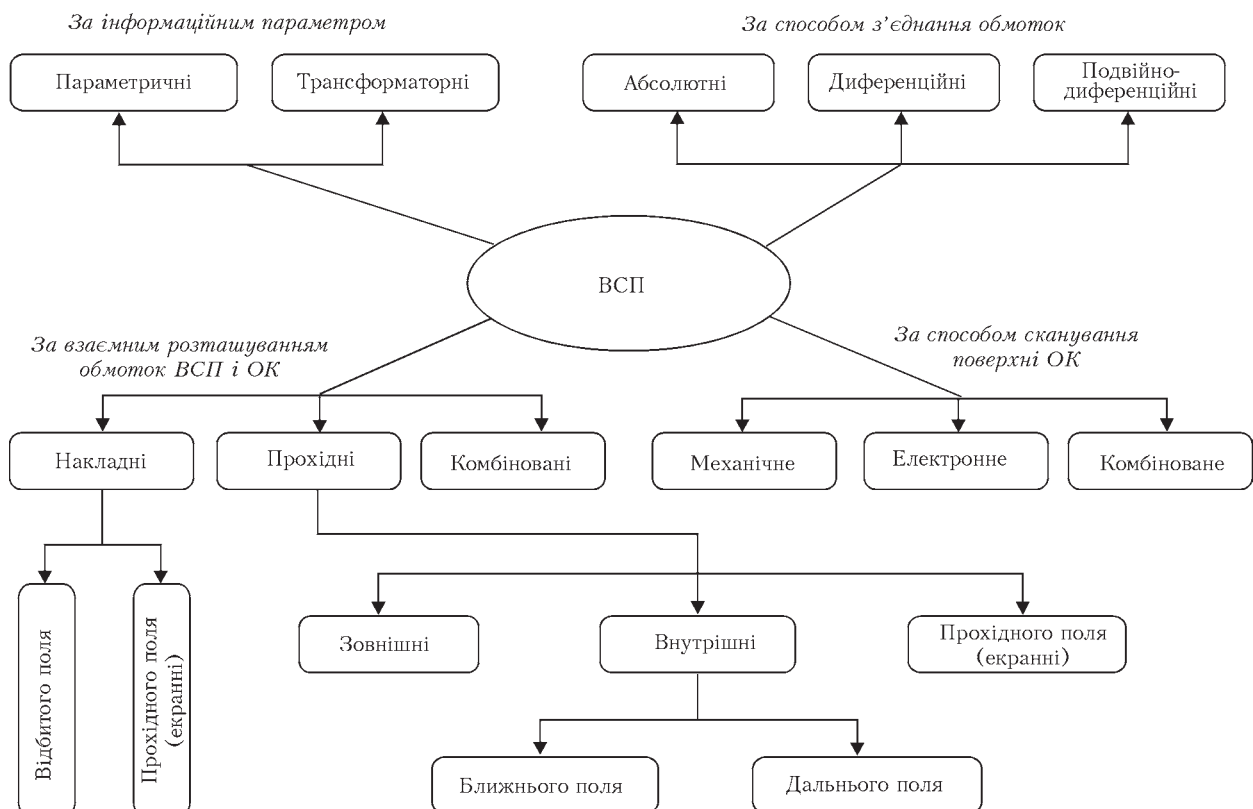


Рис. 1. Запропонована класифікація вихрострумівих перетворювачів

завжди відповідають фізичній суті окремих типів ВСП. В цій статті зроблена спроба запропонувати проект загальної класифікації ВСП з метою розпочати дискусію щодо її формування.

**Проект розширеної класифікації вихрових перетворювачів.** Запропонована нова загальна класифікація ВСП подана на рис. 1, а відповідні схематичні зображення конструкцій основних типів ВСП представлено на рис. 2.

В запропонованій класифікації використано традиційні класифікаційні ознаки. Зокрема, залежно від інформаційного параметра, тобто від того, в який параметр перетворюються параметри об'єкта контролю (ОК), ВСП поділяють на параметричні (рис. 2, а-в) та трансформаторні (рис. 2, г-и). Параметричні ВСП у більшості випадків мають одну обмотку, комплексний опір (імпеданс) якої залежить від характеристик ОК.

Єдина обмотка параметричного ВСП виконує дві функції – збудження вихрових струмів і реєстрації реакції її інформаційних параметрів на зміну характеристик ОК. Тому на виносці рис. 2 ця єдина обмотка позначена подвійною нумерацією (1, 2). Трансформаторні ВСП мають, як мінімум, дві обмотки: обмотку збудження (ОЗ), яка призначена для створення первинного електромагнітного поля, і вимірювальну обмотку (ВО), на вихідну напругу якої впливають параметри ОК. Параметричні ВСП є простішими за конструкцією і можуть бути меншими за розмірами. Однак в параметричних ВСП власний опір обмотки додається до внесеного опору, що несе інформацію про параметри ОК, і нестабільність параметрів обмотки, зокрема температурна, є суттєвою. Тому вважається, що температурної стабільності легше досягнути в трансформаторних ВСП [6].

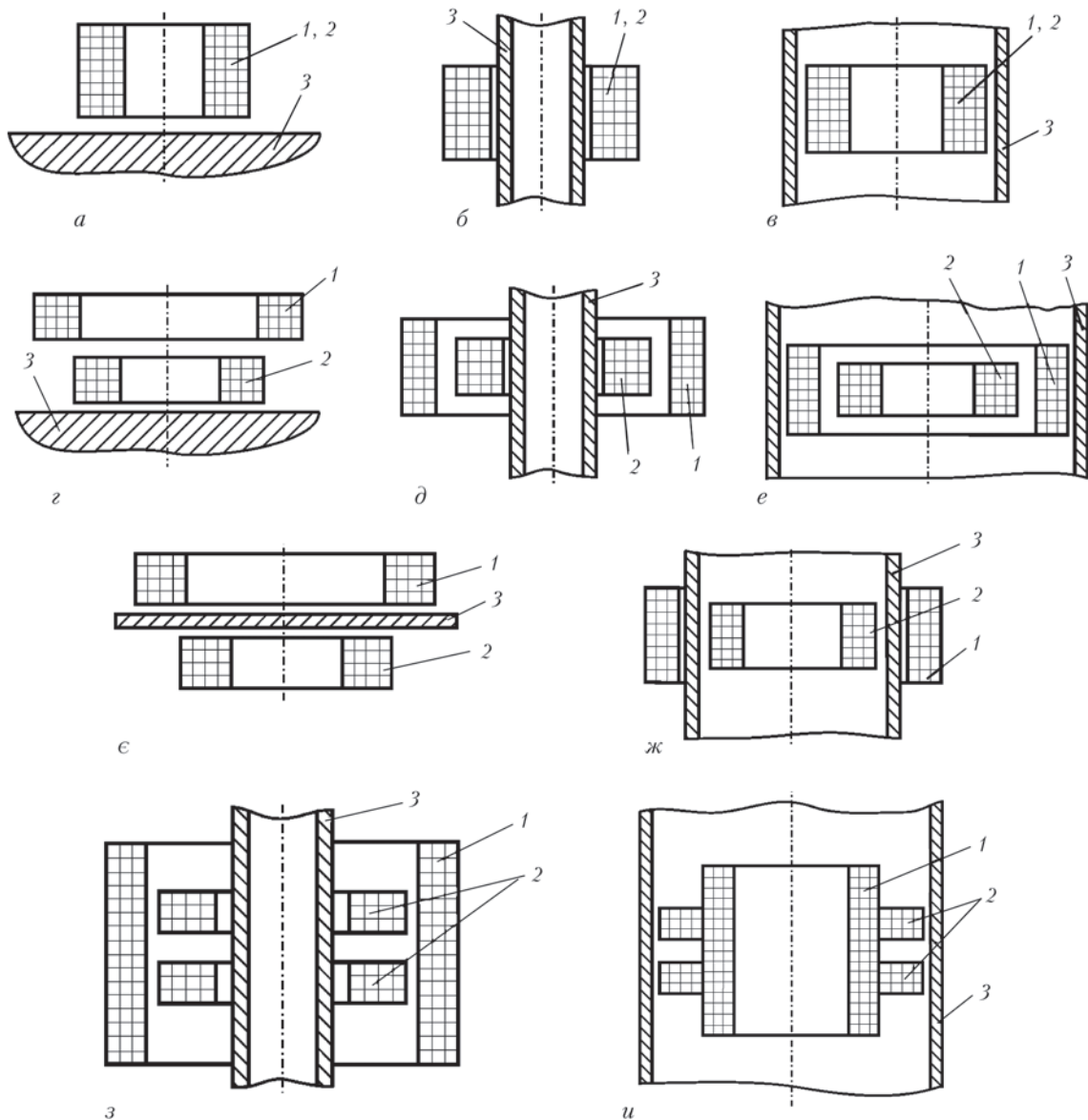


Рис. 2. Схематичне зображення конструкцій основних типів ВСП: параметричні (а-в); трансформаторні (г-и); абсолютні (а-ж); диференційні (з, у); накладні (а, з); прохідні зовнішні (б, д, з); прохідні внутрішні (в, е, у); відбитого поля (а-е, з, у); прохідного поля (екранні) (е, ж); 1 – обмотка збудження; 2 – вимірювальна обмотка; 3 – об'єкт контролю

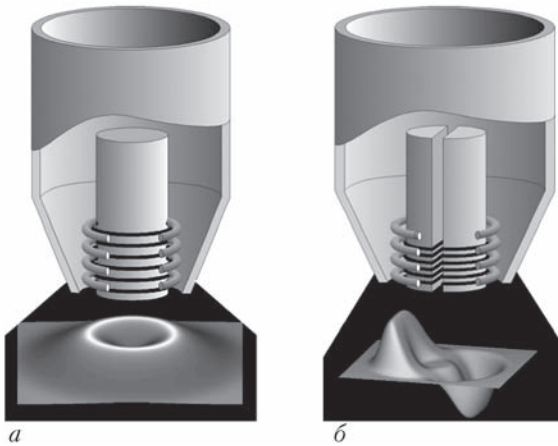


Рис. 3. Накладні ВСП абсолютного (а) і диференційного (б) типу і відповідні просторові розподіли чутливості

Залежно від взаємного розташування ВСП відносно ОК їх традиційно поділяють на накладні (рис. 2, а, з), прохідні (рис. 2, б, в, д, е, з, и) та комбіновані [1–13]. У свою чергу трансформаторні накладні ВСП можуть бути відбитого поля (рис. 1), в яких усі обмотки розташовані по один бік ОК, і прохідного поля (екранні), в яких обмотка збудження і вимірювальна обмотки розташовані по різні боки ОК. Така назва краще відображує фізичну суть відповідних ВСП. Накладні ВСП містять одну або декілька обмоток, які взаємодіють з обмеженою ділянкою поверхні ОК, і є найбільш універсальними і розповсюдженими. Їх здебільш використовують для контролю плоских поверхонь та поверхонь з великим радіусом кривизни. Нагадаємо, що детальна класифікація накладних ВСП розглядалась раніше [13, 14]. Прокідні ВСП використовують для контролю лінійно-видовжених об'єктів (прутки, дріт, труби тощо) і поділяють на зовнішні (рис. 2, б, д, з) і внутрішні (рис. 2, в, е, и). Зовнішні ВСП охоплюють ОК ззовні, а внутрішні проходять усередині ОК. Комбіновані ВСП є комбінацією накладних та прохідних і використовуються рідко.

Залежно від способу з'єднання обмоток і, відповідно, способу перетворення параметрів ОК в параметри сигналу слід розрізняти абсолютні (рис. 2, а–ж), диференційні (рис. 2, з, и) і подвійно-диференційні ВСП. Вихідний сигнал абсолютного ВСП залежить від абсолютного значення параметрів ОК, а диференційного – від різниці цих параметрів на двох ділянках ОК. На рис. 3 зображено найпростіші накладні ВСП абсолютного (а) і диференційного (б) типу, а також просторовий розподіл їх чутливості до локального дефекту [9, 10]. ВСП подвійного диференціювання у відомих загальних класифікаціях не були присутні, так як в роботах [13, 14] вони були введені тільки для накладних ВСП. Раніше накладні цього типу називалися мультидиференційними. Але цей термін не відповідав європейському стандарту з термінології, в якому було введено терміни «подвійно-

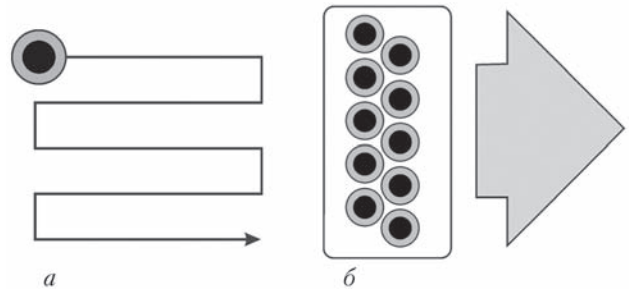


Рис. 4. Процедури вихрострумове контролю за механічного (а) і комбінованого (електронного і механічного) сканування багатоелементним ВСП (б)

диференційний перетворювач» (double differential probe) і «подвійно-диференційне вимірювання» (double differential measurement) [15].

Подвійно-диференційне перетворення сигналів ВСП більше притаманне для ВСП прохідного типу [16–18]. Для накладних ВСП подвійно-диференційні перетворення, які розглядалися детально в роботі [14], є не настільки очевидні.

Сканування і збирання інформації може бути реалізовано шляхом традиційної процедури механічного сканування поверхні ОК, яка для накладних ВСП найчастіше здійснюється шляхом зигзагоподібного пересування ВСП по контрольованій поверхні (рис. 4, а). Новим перспективним напрямком розвитку технологій вихрострумове контролю є використання багатоелементних ВСП (array eddy current probe) з електронним підключенням елементів до дефектоскопу [19–24]. Враховуючи перспективи багатоелементних ВСП розроблено відповідний стандарт, який знаходиться на стадії затвердження [24]. При використанні багатоелементних ВСП може бути реалізоване комбіноване сканування поверхні ОК, коли електронним способом шляхом мультиплексування багатоелементних ВСП збирається інформація в одному напрямку, а сканування усієї поверхні ОК здійснюється механічним переміщенням у перпендикулярному напрямку (велика стрілка на рис. 4, б). Розташування окремих обмоток багатоелементного ВСП у 2 ряди на рис. 4, б виконано для усунення «мертвих» зон. Такий спосіб збирання інформації з поверхні ОК є наразі найбільш використовуваним. Можливе і повне виключення механічного сканування поверхні, коли уся контрольована ділянка поверхні ОК може бути заповнена обмотками багатоелементного ВСП.

Недоліком чисто механічного способу сканування поверхні ОК є низька продуктивність контролю, а також низька його достовірність за ручного контролю або необхідність використання спеціального сканера під час механізованого контролю. Використання багатоелементних ВСП значно підвищує продуктивність контролю. Але вартість таких ВСП і багатоканальних дефек-



Рис. 5. Багатоелементний ВСП фірми Olympus NDT

тоскопів, споряджених керованим мультиплексорним блоком, є набагато вищою, ніж вартість одноканалних дефектоскопів. В якості прикладу можна назвати прилад OmniScan MX фірми Olympus NDT, який підтримує роботу з багатоелементним ВСП (рис. 5), кількість елементів в якому може досягати 32-х (а при використанні зовнішнього мультиплексору багатоелементний ВСП може складатися із 64 елементів). Ще більше вражають прилади ECTANE 2 канадської фірми EDDYFI, окремі модифікації якого можуть мати до 256 елементів в одному багатоелементному ВСП. Ця фірма випускає також гнучкі багатоелементні ВСП, які легко адаптуються для контролю об'єктів з різною кривизною поверхні (рис. 6).

Прохідні внутрішні ВСП трансформаторного типу на рис. 2, *e*, *и* можна назвати перетворювачами ближнього поля на відміну від внутрішніх ВСП дальнього поля, які переважно і найефективніше використовують для виявлення дефектів труб теплообмінників із феромагнітних сплавів (рис. 7) [25, 26]. В цій технології використовують найчастіше одну ОЗ 1 і одну або дві ВО 2, яка (які) виконані коаксіальними відносно контрольованої труби 3. При цьому ВО розташовані на відстані, що дорівнює приблизно 2...3 діаметри труби. Крім того, використовують достатньо низькі робочі частоти, щоб зменшити загасання вихрових струмів. В таких ВСП розділяють первинне пряме 4 і непряме 5 вторинне електромагнітні поля (показано умовно стрілками на рис. 7). На відстані більше двох діаметрів від ОЗ пряме електромагнітне поле у ВСП дальнього поля різко зменшується, в той час як непряме розповсюджується далі. Метод дальнього

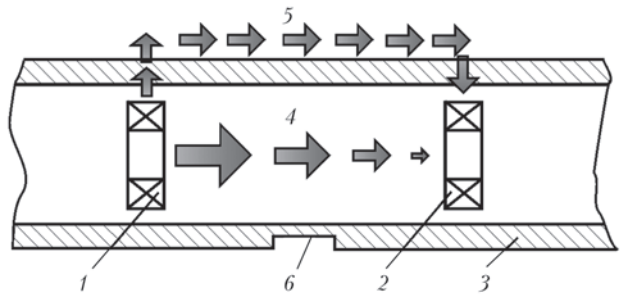


Рис. 7. ВСП дальнього поля: 1 – ОЗ; 2 – ВО; 3 – контрольована труба; 4, 5 – пряме і непряме електромагнітні поля; 6 – пошкодження труби

поля базується на використанні непрямого 5 електромагнітного поля, що виходить назовні труби, тобто досягає ВО двічі проходячи через стінку труби. Вважається, що на певній віддалі від ОЗ вплив цієї складової стає суттєвим, ніж електромагнітне поле прямої взаємодії, яке використовується в звичайних прохідних ВСП. Під час проходження електромагнітного поля через стінку труби воно змінюється за амплітудою і фазою залежно від локальної товщини стінки, що може бути використано для оцінки глибини і протяжності корозійних пошкоджень під час інтерпретації результатів контролю. Для таких ВСП вплив точності їх центрування відносно контрольованої труби є не таким суттєвим порівняно зі звичайними внутрішніми прохідними ВСП. Технології контролю за методом дальнього поля забезпечують приблизно однакову чутливість до дефектів на внутрішній і зовнішній поверхні труби.

Таким чином, розглянуто конструкції основних типів ВСП, що входять до нової загальної класифікації.

**Список літератури**

1. Беда П. И., Выборнов Б. И., Глазков Ю. А. и др. (1976) *Не разрушающий контроль металлов и изделий: Справочник*. Самойлович Г. С. (ред.). Москва, Машиностроение.
2. Дорофеев А. Л., Никитин А. И., Рубин А. Л. (1978) *Индукционная толщинометрия*. Москва, Энергия.
3. Дорофеев А. Л., Казаманов Ю. Г. (1980) *Электромагнитная дефектоскопия*. Москва, Машиностроение.
4. Герасимов В. Г., Останин Ю. А., Покровский А. Д. и др. (1978) *Не разрушающий контроль качества изделий электромагнитными методами*. Москва, Энергия.
5. Герасимов В. Г., Клюев В. В., Шатерников В. Е. (1983) *Методы и приборы электромагнитного контроля промышленных изделий*. Москва, Энергоатомиздат.
6. Соболев В. С., Шкарлет Ю. М. (1967) *Накладные и экранные датчики*. Новосибирск, Наука.
7. Герасимов В. Г., Покровский А. Д., Сухоруков В. В. (1992) *Не разрушающий контроль*. В 5 кн. Кн. 3. Электромагнитный контроль: Практик. пособие; В. В. Сухоруков (ред.). Москва, Высшая школа.
8. Дякин В. В., Сандовский В. А. (1981) *Теория и расчет накладных вихревых преобразователей*. Москва, Наука.
9. (2001) *Механіка руйнування і міцність матеріалів*. Довідн. посібник. Т 5. *Неруйнівний контроль та технічна діагностика*. Назарчук З. Т. (ред.). Львів, ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України.
10. Осташ О. П., Федірко В. М., Учанін В. М. та ін. (2007) *Механіка руйнування і міцність матеріалів: довідн. посібник*. В. В. Панасюк (ред.). Т. 9. *Міцність і довговічність авіаційних матеріалів та елементів конструкцій*. Львів, Сполом.



Рис. 6. Багатоелементний гнучкий ВСП фірми EDDYFI



11. Libby H. L. (1971) *Introduction to Electromagnetic Nondestructive Test Methods*. New-York etc, Wiley – Interscience.
12. Меркулов А. И. (1992) О подобии конструкций параметрических накладных электромагнитных преобразователей. *Приборы и системы управления*, **8**, 20–23.
13. Учанин В. Н. (2010) Вихретоковые накладные преобразователи: расширенная классификация, сравнительный анализ и характерные примеры реализации (Обзор). *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **4**, 24–29.
14. Учанин В. М. (2013) *Вихроструміві накладні перетворювачі подвійного диференціювання*. Львів, Сполум.
15. (1998) Европейский стандарт EN 1330-5:1998 *Non-destructive testing – Terminology. Part 5. Terms used in Eddy Current testing*. Technical committee CEN/TC 138.
16. Булгаков В. Ф., Жуков В. К. (1981) *Проходное вихретоковое устройство*. А. с. 853518 (СССР). G01N27/96.
17. Винокуров Б. Б., Мизин В. Г. (1981) *Проходной вихретоковый преобразователь*. А. с. 868551 (СССР). G01N27/96.
18. Винокуров Б. Б., Мизин В. Г. (1983) *Проходной вихретоковый преобразователь*. А. с. 1040403 (СССР). G01N27/90.
19. Mook G., Michel F., Simonin J. (2008) Electromagnetic imaging using probe arrays, *17<sup>th</sup> World Conf. on Non-destructive Testing, paper 380, Shanghai*, 2008 (www.ndt.net).
20. Hardy F., Desmaures de St-A., Samson R. (2002) *Eddy current probe with multi-use coils and compact configuration*. USA, Pat. № 6344739. G01N27/90.
21. Decitre J.-M., Premel D., Mangenet G. et al. (2006) Flexible EC Array Probe for the Inspection of Complex Parts developed within the European VERDICT Project, *9<sup>th</sup> Europ. Conf. on NDT, Berlin*, 2006, paper Tu.4.4.3.
22. Bureau J.-F., Ward R.C., Julien A. (2012) Application of Eddy Current Array Technology to Surface Inspection *18th World Conference on Nondestructive Testing, 16–20 April 2012, Durban, South Africa*.
23. Gramz. M., Stepinski T. (1994) Eddy Current Imaging array sensors and flaw reconstruction. *Research in Nondestructive Evaluation*, **5**, 157–174.
24. (2015) Draft International Standard ISO/DIS 20339:2015(E). *Non-destructive testing. Equipment for eddy current examination: Array probes characteristics and verification*. European Committee for Standardization.
25. Schmidt T. R. (1984) The remote field eddy current inspection technique. *Materials Evaluation*, **2**, 225–230.
26. Mackintosh D. D., Atherton D. L., Sullivan S. P. (1993) Remote-field eddy current signal analysis in small-bore ferromagnetic tubes. *Ibid.*, **4**, 492–495.
10. Ostash, O.P., Fedirko, V.M., Uchanin, V.M. et al. (2007) *Fracture mechanics and strength of materials: Refer. book. Vol. 9: Strength and fatigue life of aviation materials and structural elements*. Ed. by V.V. Panasyuk. Lviv, Spolom [in Ukrainian].
11. Libby, H.L. (1971) *Introduction to electromagnetic nondestructive test methods*. New-York, Wiley – Interscience.
12. Merkulov, A.I. (1992) On design similarity of parametric put-on electromagnetic transducers. *Pribory i Sistemy Upravleniya*, **8**, 20-23 [in Russian].
13. Uchanin, V.N. (2010) Eddy current overlay transducers: expanded classification, comparative analysis and characteristic examples of realization (Review). *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **4**, 24-29 [in Russian].
14. Uchanin, V.M. (2013) *Eddy current put-on double differentiation transducers*. Lviv, Spolom [in Ukrainian].
15. (1998) EN 1330-5: 1998: *Non-destructive testing. Terminology. Pt 5: Terms used in eddy current testing. Technical Committee CEN/TC 138*.
16. Bulgakov, V.F., Zhukov, V.K. (1981) *Through-type eddy current device*. USSR author's cert. 853518, Int. Cl. G01N27/96 [in Russian].
17. Vinokurov, B.B., Mizin, V.G. (1981) *Through-type eddy current transducer*. USSR author's cert. 868551, Int. Cl. G01N27/96 [in Russian].
18. Vinokurov, B.B., Mizin, V.G. (1983) *Through-type eddy current transducer*. USSR author's cert. 1040403, Int. Cl. G01N27/90 [in Russian].
19. Mook, G., Michel, F., Simonin, J. (2008) *Electromagnetic imaging using probe arrays*. In: *Proc. of 17th World Conf. on Non-Destructive Testing Shanghai, 2008*, paper 380. (www.ndt.net).
20. Hardy, F., Desmaures de St.-A., Samson, R. (2002) *Eddy current probe with multiuse coils and compact configuration*. Pat. 6344739, USA, Int. Cl. G01N27/90.
21. Decitre, J.-M., Premel, D., Mangenet, G. et al. (2006) *Flexible EC array probe for the inspection of complex parts developed within the European VERDICT Project*. In: *Proc. of 9th Europ. Conf. on NDT, Berlin, 2006*, Paper TU.4.4.3.
22. Bureau, J.-F., Ward, R.C., Julien, A. (2012) *Application of eddy current array technology to surface inspection*. In: *Proc. of 18th World Conf. on Nondestructive Testing (16-20 April 2012, Durban, South Africa)*.
23. Gramz, M., Stepinski, T. (1994) *Eddy current imaging array sensors and flaw reconstruction*. *Research in Nondestructive Evaluation*, **5**, 157-174.
24. (2015) Draft International Standard ISO/DIS 20339:2015(E). *Non-destructive testing. Equipment for eddy current examination: Array probes characteristics and verification*. European Committee for Standardization.
25. Schmidt T.R. (1984) *The remote field eddy current inspection technique*. *Materials Evaluation*, **2**, 225-230.
26. Mackintosh, D.D., Atherton, D.L., Sullivan, S.P. (1993) *Remote-field eddy current signal analysis in small-bore ferromagnetic tubes*. *Ibid.*, **4**, 492-495.

#### References

1. Beda, P.I., Vybornov, B.I., Glazkov, Yu.A. et al. (1976) *Nondestructive testing of metals and products: Refer. book*. Ed. by G.S. Samoylovich. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
2. Dorofeev, A.L., Nikitin, A.I., Rubin, A.L. (1978) *Induction thickness measurement*. Moscow, Energiya [in Russian].
3. Dorofeev, A.L., Kazamanov, Yu.G. (1980) *Electromagnetic flaw detection*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
4. Gerasimov V.G., Ostanin, Yu.A., Pokrovskii, A.A. et al. (1978) *Nondestructive testing of product quality by electromagnetic methods*. Moscow, Energiya [in Russian].
5. Gerasimov, V.G., Klyuev, V.V., Shaternikov, V.E. (1983) *Methods and instruments for electromagnetic control of industrial products*. Moscow, Energoatomizdat [in Russian].
6. Sobolev, V.S., Shkarlet, Yu.M. (1967) *Put-on and screen sensors*. Novosibirsk, Nauka [in Russian].
7. Gerasimov, V.G., Pokrovskii, A.D., Sukhorukov, V.V. (1992) *Nondestructive testing. In: 5 books. Book 3: Electromagnetic testing: Manual*. Ed. by V.V. Sukhorukov. Moscow, Vyschaya Shkola [in Russian].
8. Dyakin, V.V., Sandovskii, V.A. (1981) *Theory and calculation of put-on eddy current transducers*. Moscow, Nauka [in Russian].
9. (2001) *Fracture mechanics and strength of materials: Refer. book. Vol. 5: Nondestructive testing and technical diagnostics*. Ed. by Z.T. Nazarchuk. Lviv, G.V. Karpenka PMI [in Ukrainian].

В. Н. УЧАНИН

Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко НАН Украины. 79060, г. Львов, ул. Научная, 5. E-mail: uchanin@ipm.lviv.ua; vuchanin@gmail.com

#### ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ КЛАССИФИКАЦИИ ВИХРЕТОКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Предложен проект расширенной общей классификации конструкций вихретокового преобразователя. В предложенную классификацию, в частности, впервые введены многоэлементные вихретоковые преобразователи, которые реализуют технологию электронного или комбинированного сканирования поверхности объекта контроля, а также вихретоковые преобразователи дальнего поля. Даны примеры построения конструкций вихретоковых преобразователей, в частности,

многэлементных вихретоковых преобразователей и вихретоковых преобразователей дальнего поля. Библиогр. 26, рис. 7.

Ключевые слова: вихретоковый контроль, вихретоковые преобразователи, конструкция, классификация

PROPOSITIONS ON IMPROVEMENT OF THE CLASSIFICATION OF EDDY CURRENT TRANSDUCERS

V.M.UCHANIN

G.V.Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, 5, Naukova str., 79060, Lviv, Ukraine. E-mail: uchanin@ipm.lviv; uchanin@gmail.com

A draft of an extended general classification of eddy current designs was proposed. In particular, multielement eddy current transducers, which realize the technology of electronic or combined scanning of the surface of the object of control, as well as the far-field eddy current transducers were added to the proposed classification for the first time. Examples of the design of eddy current transducer structures are given, in particular, of multielement eddy current transducers and far-field eddy current transducers. 26 References, 7 Figures.

Keywords: eddy current testing, eddy current transducers, design, classification

Надійшла до редакції  
16.05.2018

НОВІ КНИГИ



*Божидарнік В.В., Скальський В.Р., Матвійв Ю.Я.* Діагностування руйнування скловолоконних композитів методом акустичної емісії. – К.: Наукова думка, 2013. – 256 с.



*Скальський В.Р., Божидарнік В.В., Станкевич О.М.* Акустико-емісійне діагностування типів макроруйнування конструкційних матеріалів. – К.: Наукова думка, 2014. – 264 с.



*Скальський В.Р., Божидарнік В.В., Долінська І.Я.* Основи механіки руйнування для зварювальників: навч. посіб. – Луцьк, 2014. – 356 с.



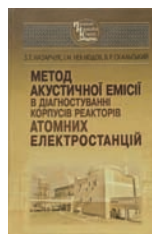
*Назарчук З.Т., Скальський В.Р., Почапський Є.П.* Технології відбору та опрацювання низькоенергетичних діагностичних сигналів. – К.: Наукова думка, 2014. – 304 с.



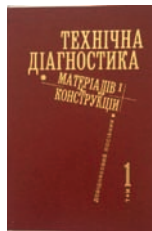
*Скальський В.Р., Ярема Р.Я.* Методи розрахунку ресурсу, відновлення і відбракування кілець буксового підшипника локомотивів. – Львів, 2015. – 288 с.



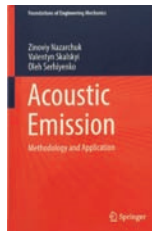
*Метод акустичної емісії в дослідженні стоматологічних полімерів / В.Р. Скальський, В.Ф. Макеев, О.М. Станкевич, О.С. Кирманов, Б.П. Клим.* – Львів: Кварт, 2015. – 150 с.



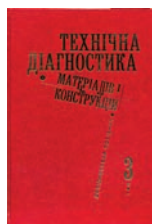
*Назарчук З.Т., Неклюдов І.М., Скальський В.Р.* Метод акустичної емісії в діагностуванні корпусів реакторів атомних електростанцій. – К.: наукова думка, 2016. – 306 с.



**Технічна діагностика матеріалів і конструкцій: у 8-ми т. Том 1. Експлуатаційна деградація конструкційних матеріалів / Є.І. Крижанівський, О.П. Остап, Г.М. Никифорчин, О.З. Студент, П.В. Ясній;** за заг. ред. З.Т. Назарчука. – Львів: Простір-М, 2016. – 360 с.



*Nazarchuk Z., Skalskyi V., Serhiyenko O.* Acoustic emission. Methodology and Application. – Springer International Publishing AG, 2017. – XIV, 283 p.

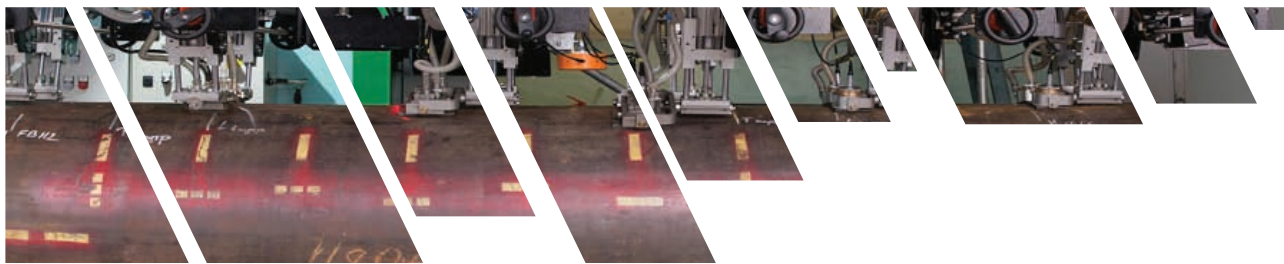


**Технічна діагностика матеріалів і конструкцій: у 8-ми томах. Том 3. Моніторинг напруженого стану елементів конструкцій з використанням електромагнітних хвиль оптичного діапазону. / Л. М. Лобанов, Л. І. Муравський, В. А. Півторак, Т.І. Вороняк.** – Львів: «Простір-М», 2017. – 340 с.



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

Подписано к печати 24.05.2018. 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.



Національна академія наук України  
 Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона  
 Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики  
 Міжнародна Асоціація «Зварювання»



XXII МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ

# СУЧАСНІ МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ І ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ

## 10–14 вересня 2018

Одеса, Аркадія, готель «Курортний»

Присвячується 100-річчю  
 Національної академії наук України

Генеральний спонсор  
 ПрАТ «УкрНДІНК»



Спонсори



**ОРГАНІЗАТОР КОНФЕРЕНЦІЇ**

Міжнародна Асоціація «Зварювання»  
 вул. Казимира Малевича 11, м. Київ, 03150  
 тел. (+38044) 200-82-77, 205-22-49  
 journal@paton.kiev.ua  
 posypaiko.yurii@gmail.com

<http://pwi-scientists.com/rus/nktd2018>

## КОНФЕРЕНЦИЯ «НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ – 2018»

16–17 мая 2018 г. состоялась ежегодная конференция-выставка «Неразрушающий контроль-2018», организованная группой компаний «Ассоциация «ОКО». Целью конференции был обмен опытом в области неразрушающего контроля, информирование участников о новых разработках, а также установление деловых и коммерческих контактов и в перспективе создание новой техники и технологий.

Конференция была приурочена к 25-летию юбилею НПФ «Ультракон-сервис». Первое пленарное заседание конференции открыли председатель УО НКТД проф. Троицкий В.А. и генеральный директор Ассоциации «ОКО» Луценко Т.М. Участников конференции также приветствовал зам. директора ИЭС им. Е.О. Патона, академик НАН Украины Лобанов Л.М.

Во время пленарного заседания были представлены следующие доклады:

- Современные ультразвуковые каналы для автоматизации контроля. Прецизионная толщинометрия, порталные дефектоскопы (Галаненко Д.В.);
- Система автоматизированного вихретокового контроля авиационных колес SmartScan (Опанасенко А.В.);
- Использование ультразвуковых, вихретоковых и магнитных дефектоскопов в железнодорожной отрасли (Мищенко В.П.);
- Новые автоматизированные и механизированные системы НК, внедренные в 2017–2018 гг. (Бондарчук Д.Н.);
- Автоматизация неразрушающего контроля прокатных валков при производстве. Интеграция системы со всеми типами шлифовальных станков (Дидык А.В.);
- TOFD метод как средство для повышения качества и производительности проведения ультразвукового контроля сварных соединений. Система «TOFD-map» (Галаненко Д.В.);

• Оборудование вихретокового контроля для применения в авиационной промышленности (Опанасенко А.В.);

• Особенности сертификации персонала по НК, в т.ч. на украинских железных дорогах (Радько В.И.);

• Особенности изготовления и применения УЗ преобразователей в соответствии с требованиями заказчика (Черненко А.И.);

• Вихретоковый метод оценки напряжения в конструкциях из ферромагнитных сталей (Минаков С.Н., Учанин В.Н.);

• Автоматизация ультразвукового контроля железнодорожных осей при выпуске из производства в соответствии с международными стандартами (Свистун А.В.);

• Автоматизация магнитопорошкового контроля продукции при выпуске из производства (Бондарчук Д.Н.);

• Типы ВТП, применяемые для контроля теплообменных труб парогенераторов ПГВ-1000М (Ильчинин Р.В.);

• Акустикоэмиссионный контроль технологических трубопроводов (Галаненко Д.В.).

Второй рабочий день конференции был посвящен работе в секциях «НК на железнодорожном транспорте», «НК в авиации», «НК в энергетике», «НК в металлургии и машиностроении», «Сертификация персонала НК».

На специализированной выставке, которая работала во время конференции, участники могли познакомиться с продукцией НПФ «Ультракон-сервис»; НПФ «Промприбор» и Украинского НИИ неразрушающего контроля.

Участники конференции (а их было более 150) посетили заповедник «Феофания» и смогли плодотворно пообщаться во время общего дружественного ужина.

*Редколлегия журнала*

