

# ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

№ 4, 2009

Издается с января 1989 г.

Учредители: Национальная академия наук Украины

Издатель: Международная ассоциация «Сварка»

Институт электросварки им. Е. О. Патона

Международная ассоциация «Сварка»

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор

**Б. Е. ПАТОН**

А. Я. Недосека (зам. гл. ред.),  
В. А. Троицкий (зам. гл. ред.),  
З. А. Майдан (отв. секр.),  
Н. П. Алешин, А. И. Бондаренко,  
В. Л. Венгринович, А. А. Грузд,  
М. Л. Казакевич, О. М. Карпаш,  
В. В. Ключев, А. А. Лебедев,  
Л. М. Лобанов, Г. Г. Луценко,  
З. Т. Назарчук, Н. В. Новиков,  
Г. И. Прокопенко,  
В. А. Стороженко, В. А. Стрижало,  
В. Г. Тихий, В. Н. Учанин,  
С. К. Фомичев, Н. Г. Чаусов,  
В. Е. Щербинин

### Адрес редакции

03680, Украина, г. Киев-150,  
ул. Боженко, 11  
Институт электросварки  
им. Е. О. Патона НАН Украины  
Тел.: (044) 271-23-90,  
Факс: (044) 528-34-84, 529-26-23  
E-mail: journal@paton.kiev.ua  
http://www.nas.gov.ua/pwj

### Научные редакторы

Н. Г. Белый, А. А. Грузд

### Электронная верстка

Л. Н. Герасименко, Д. И. Середа,  
И. Р. Наумова, Т. В. Юштина

### Свидетельство

о государственной регистрации  
КВ 4787 от 09.01.2001

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

При перепечатке материалов  
ссылка на журнал обязательна

## СОДЕРЖАНИЕ

ИНСТИТУТУ ЭЛЕКТРОСВАРКИ ИМ. Е. О. ПАТОНА  
НАН УКРАИНЫ — 75 ЛЕТ ..... 3

### ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА

*ЛОБАНОВ Л. М., НЕДОСЕКА А. Я., НЕДОСЕКА С. А., ЦАРЮК А. К., ГРУЗД А. А., ХАРЧЕНКО Л. Ф., ЯРЕМЕНКО М. А.* Исследование АЭ характеристик материалов при высоких температурах. Сообщение 2 ..... 5  
*НАЗАРЧУК З. Т., СКАЛЬСЬКИЙ В. Р.* Методология акустико-емисийного діагностування залізобетонних елементів мостових конструкцій ..... 14

### НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

*ТРОИЦКИЙ В. А.* Совершенствование мониторинга технического состояния морских судов ..... 26  
*РИЖИКОВ В. Д., ОПОЛОНІН О. Д., ЛИСЕЦЬКА О. К., ГАЛКІН С. Н., ВОРОНКІН Е. Ф., ПЕРЕВЕРТАЙЛО В. Л.* Приемально-детектующий тракт цифровой радиографической системы з підвищеним просторовим розділенням ..... 30  
*КОЛЯДА В. А.* Бесконтактная сенсорная система для оценки геометрических параметров профилей железнодорожных рельсов ..... 34  
*ЛАЗОРЕНКО Я. П., ШАПОВАЛОВ Е. В., СКУБА Т. Г., ТОПЧЕВ Д. Д., КЛИЩАР Ф. С.* Исследование алгоритмов сегментации рентгенотелевизионных изображений сварных швов для автоматического обнаружения дефектов ..... 37  
*ГИЛЕВА О. А., ЕРЕМЕНКО В. С.* Методика построения решающих правил при многопараметровом неразрушающем контроле ..... 43

### ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

*ДОЛИНСКИЙ В. М., ЧЕРЕМСКАЯ В. И.* Несущая способность обечаек сосудов с местными утонениями стенок ..... 48  
*САДИЛО А. В., МАКАЦ В. Г., РАХМАННЫЙ А. С.* Применение метода твердометрии при обследовании грузоподъемных механизмов ..... 52

### ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ

17-я Международная конференция «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики» ..... 57  
Открытие мемориальных досок ..... 58  
Якість — в ім'я кращого життя ..... 59  
Поздравляем с юбилеем! ..... 60  
Программы профессиональной подготовки на 2010 г. .... 61

ИЗДАНИЕ ЖУРНАЛА ПОДДЕРЖИВАЮТ:

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



Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики

# TECHNICAL DIAGNOSTICS and NON-DESTRUCTIVE TESTING

№ 4, 2009

Founded in January, 1989

**Founders:** The National Academy of Sciences of Ukraine  
The E. O. Paton Electric Welding Institute  
International Association «Welding»

**Publisher:** International Association «Welding»

## EDITORIAL BOARD:

Editor-in-Chief  
**B. E. PATON**

A. Ya. Nedoseka (vice-chief ed.),  
V. A. Troitsky (vice-chief ed.),  
Z. A. Maidan (exec. secr.),  
N. P. Aleshin, A. I. Bondarenko,  
V. L. Vengrinovich, A. A. Gruzd,  
M. L. Kazakevich, O. M. Karpash,  
V. V. Klyuev, A. A. Lebedev,  
L. M. Lobanov, G. G. Lutsenko,  
Z. T. Nazarchuk, N. V. Novikov,  
G. I. Prokopenko,  
V. A. Storozhenko, V. A. Strizhalo,  
V. G. Tikhy, V. N. Uchanin,  
S. K. Fomichev, N. G. Chausov,  
V. E. Shcherbinin

### Address:

The E. O. Paton Electric  
Welding Institute  
of the NAS of Ukraine,  
11 Bozhenko str., 03680,  
Kyiv, Ukraine  
Tel.: (044) 271-23-90,  
Fax: (044) 528-34-84, 529-26-23  
E-mail: journal@paton.kiev.ua  
http://www.nas.gov.ua/pwj

### Scientific editors:

N. G. Bely, A. A. Gruzd

### Electron galley:

I. R. Naumova, D. I. Sereda,  
L. N. Gerasimenko, T. V. Ushtina

State Registration Certificate  
KV 4787 of 09.01.2001

All rights reserved.  
This publication and  
each of the articles  
contained here in are  
protected by copyright.

Permission to reproduce material  
contained in this journal  
must be obtained  
in writing from the Publisher.

## CONTENTS

75th anniversary of the E. O. Paton Electric Welding Institute ..... 3

### TECHNICAL DIAGNOSTICS

*LOBANOV L. M., NEDOSEKA A. Ya., NEDOSEKA S. A., TSARYUK A. K., GRURZD A. A., KHARCHENKO L. F., YAREMENKO M. A.* Study of AE characteristics of materials at high temperatures. Communication ..... 5  
*NAZARCHUK Z. T., SKALSKII V. R.* Procedure of acoustic emission diagnostics of reinforced concrete elements of bridge structures ..... 14

### NON-DESTRUCTIVE TESTING

*TROITSKII V. A.* Improvement of monitoring of technical condition of sea ships ..... 26  
*RYZHIKOV V. D., OPOLONIN O. D., LISETSKA O. K., GALKIN S. N., VORONKIN E. F., PEREVERTAILO V. L.* Receiving-detecting channel of digital radiographic system with an increased spatial distribution ..... 30  
*KOLYADA V. A.* Contactless sensory system for evaluation of the geometrical parameters of railway rail profiles ..... 34  
*LASORENKO Ya. P., SHAPOVALOV E. V., SKUBA T. G., TOPCHEV D. D., KLISHCHAR F. S.* Studying the algorithms of segmentation of X-ray TV images of welds for automatic detection of defects ..... 37  
*GILEVA O. A., EREMENKO V. S.* Procedure of construction of decision rules in multiparametric NDT ..... 43

### INDUSTRIAL

*DOLYNSKII V. M., CHEREMSKAYA V. I.* Load-carrying capacity of vessel shells with local wall thinning ..... 48  
*SADILLO A. V., MAKATS V. G., RAKHMANNY A. S.* Application of the method of hardness measurement in examination of hoisting mechanisms .. 52

### NEWS AND INFORMATION

17th International Conference «Modern Methods and Means of Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics» ..... 57  
Inauguration of memorial plaques ..... 58  
Quality for higher living standards ..... 59  
Jubilee greetings ..... 60  
Professional training programs for 2010 ..... 61

#### JOURNAL PUBLICATION IS SUPPORTED BY:

Technical Committee on standardization «Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing» TCU-78



Ukrainian Society for Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics

---

## ИНСТИТУТУ ЭЛЕКТРОСВАРКИ им. Е. О. ПАТОНА НАН УКРАИНЫ — 75

2 октября в ИЭС им. Е. О. Патона состоялось торжественное собрание в связи с 75-летием института, всемирно известного научно-исследовательского центра в области сварки, спецэлектрометаллургии и нанесения защитных покрытий. В нем приняли участие сотрудники института, а также многочисленные гости — руководители ведомств, предприятий, ведущих академических, научно-исследовательских учреждений и высших учебных заведений Украины.

Собрание открыл Президент Национальной академии наук Украины директор ИЭС им. Е. О. Патона академик Б. Е. Патон с докладом об основных этапах деятельности института в различные периоды. Он отметил, что ... «Институт имеет мощный научный потенциал, развивается, совершенствуются его структура и система управления — все направлено на дальнейшее развитие сварки и родственных процессов, на решение базовых проблем производства».

Борис Евгеньевич искренне поблагодарил всех тех, кто поздравил коллектив института с юбилеем, дал высокую оценку его деятельности и высказал надежду в отношении дальнейшего развития института и достижения молодыми учеными новых высоких результатов в теории и практике сварочного производства.

Среди поздравивших десятки научных учреждений, предприятий и организаций, коллеги и друзья из Украины, России, Беларуси, Болгарии, Армении, Грузии, Казахстана, Германии, Словакии, Узбекистана.

Затем заместитель главы Секретариата Президента Украины Ю. П. Богуцкий зачитал приветствие В. А. Ющенко коллективу института, в котором высказана уверенность, что «своим высокопрофессиональным и вдохновенным трудом коллектив института и далее будет вносить весомый вклад в развитие отечественной и мировой науки, в укрепление экономики украинского государства». Ю. П. Богуцкий огласил Указ Президента Украины

о награждении государственными наградами Украины сотрудников института.

От имени Председателя Верховной Рады Украины В. М. Литвина приветствие зачитал В. Б. Яловой. В нем отмечено, что неутомимое творчество представителей известной Патоновской школы содействовало преобразованию сварки в ведущий технологический процесс во многих отраслях народного хозяйства, который находит применение в различных средах, включая водные глубины и космические высоты. Сегодня уже есть весомые результаты и в медицине — получение надежных сварных соединений мягких живых тканей. Научные достижения и разработки патоновцев, созданные ими технологии — это знаковые этапы развития мировой науки и техники. Ученые института убедительно доказали, что способны решать научно-технические проблемы любой сложности.

А. Н. Гуржий зачитал приветствие Премьер-министра Украины Ю. В. Тимошенко. В нем выражена сердечная благодарность коллективу института за самоотверженный труд и признанные научно-технические достижения, которые делают нашу экономику конкурентоспособной и приумножают научный авторитет Украины в мире.

После кратких выступлений директора ОКТБ ИЭС им. Е. О. Патона В. С. Романюка и директора Опытного завода сварочного оборудования В. И. Степахно были заслушаны приветствия и теплые поздравления в адрес коллектива института от Президиума НАН Украины (А. Г. Шпак), Отделения физико-технических проблем материаловедения НАН Украины (И. К. Походня), НТУУ «Киевский политехнический институт» (Ю. И. Якименко), Министерства промышленной политики (С. Г. Грищенко) и Председателя Голосеевской районной госадминистрации г. Киева (А. Г. Незнал).

В заключение состоялся праздничный концерт мастеров искусств и художественных коллективов Украины.

# У К А З

## ПРЕЗИДЕНТА УКРАЇНИ № 779/2009

### Про відзначення державними нагородами України працівників Інституту електрозварювання імені Є. О. Патона НАН України, м. Київ

За вагомий особистий внесок у розвиток вітчизняної науки, техніки і технологій у галузі зварювання матеріалів і конструкцій, багаторічну плідну наукову діяльність та з нагоди 75-річчя Інституту електрозварювання імені Є. О. Патона **постановляю**:

#### Нагородити орденом князя Ярослава Мудрого V ступеня

ЮЩЕНКА Костянтина Андрійовича — заступника директора, доктора технічних наук, академіка НАН України

#### Нагородити орденом «За заслуги» II ступеня

КОСЕНКА Петра Олексійовича — директора державного підприємства «Дослідний завод зварювальних матеріалів Інституту електрозварювання імені Є. О. Патона НАН України»

ЛОБАНОВА Леоніда Михайловича — заступника директора, доктора технічних наук, академіка НАН України

#### Нагородити орденом «За заслуги» III ступеня

СТРЕЛЬНИКОВА Михайла Олексійовича — головного технолога акціонерного товариства «Дослідний завод зварювального устаткування Інституту електрозварювання імені Є. О. Патона НАН України»

#### Нагородити орденом «За мужність» III ступеня

КОЦЮБУ Сергія Миколайовича — водолаза

#### Присвоїти почесні звання:

«ЗАСЛУЖЕНИЙ ДІЯЧ НАУКИ І ТЕХНІКИ УКРАЇНИ»

КИР'ЯНУ Валерію Івановичу — завідувачеві відділу, докторові технічних наук, члену-кореспонденту НАН України

НЕДОССІЦІ Анатолію Яковичу — завідувачеві відділу, докторові технічних наук, професору  
СТЕПАХНУ Володимирі Івановичу — голові правління акціонерного товариства «Дослідний завод зварювального устаткування Інституту електрозварювання імені Є. О. Патона НАН України»,  
докторові фізико-математичних наук, професору

«ЗАСЛУЖЕНИЙ ПРАЦІВНИК ПРОМИСЛОВОСТІ УКРАЇНИ»

БУБЛИКУ Володимирі Петровичу — газозварникові

ВАРИВОДІ Миколі Олексійовичу — електрозварникові

ГЕРАЦЕНКУ Віктору Борисовичу — бригадирові штампувальників акціонерного товариства «Дослідний завод зварювального устаткування Інституту електрозварювання імені Є. О. Патона НАН України»

«ЗАСЛУЖЕНИЙ МАШИНОБУДІВНИК УКРАЇНИ»

САХАРНОВУ Василю Олексійовичу — старшому науковому співробітникові

СТЕСІНУ Віктору Володимировичу — головному конструкторові державного підприємства «Дослідне конструкторське технологічне бюро Інституту електрозварювання імені Є. О. Патона НАН України».

Президент України Віктор ЮЩЕНКО  
29 вересня 2009 року



УДК 621.19.14

## ИССЛЕДОВАНИЕ АЭ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ. Сообщение 2

Л. М. ЛОБАНОВ, А. Я. НЕДОСЕКА, С. А. НЕДОСЕКА, А. К. ЦАРЮК, А. А. ГРУЗД,  
Л. Ф. ХАРЧЕНКО, М. А. ЯРЕМЕНКО

*Рассмотрены результаты исследований образцов с целью получения экспериментальных данных по АЭ свойствам некоторых металлических материалов при статическом нагружении в условиях высоких температур.*

*The paper deals with the results of testing samples in order to obtain experimental data on AE properties of some metallic materials under high temperature static loading conditions.*

Для реализации методики высокотемпературных АЭ испытаний был выбран оптимальный способ нагрева рабочей части образцов с использованием точечного нагрева в центре рабочей зоны образца, выполняемого специализированной горелкой. На его основе создан испытательный стенд (рис. 1), отработаны конструкции образцов и методика регистрации параметров испытаний. Проведены предварительные анализы параметров нагружения образцов и распространения АЭ в условиях высоких температур.

Для исследования выбран ряд модельных материалов, достаточно часто используемых в конструкциях объектов нефтехимической промышленности. Испытания материалов проведены в условиях нормальных и высоких температур с целью определения особенностей их повреждаемости и формирования источников АЭ.

В работе описаны результаты выполненных экспериментов и исследований применительно к образцам из четырех модельных материалов разных классов (рис. 2, табл. 1).

Предварительные опыты по изучению изменения параметров АЭ сигналов в условиях прохождения их через нагретый материал были проведены на полосе из стали Ст3 размерами 960×60 мм, толщиной 3 мм, установленной на двух опорах, расстояние между которыми 500 мм. По краям полосы установили два датчика АЭ на расстоянии 875 мм один от другого. Вначале при комнатной температуре, а затем на различных стадиях нагрева центральной части пластины вплоть до 620 °С

выполняли АЭ сканирование. Датчики по очереди переводили в режим излучения тестовых сигналов амплитудой 32 В, длительностью 2 мкс, которые повторяли через 1 с. Всего в каждом эксперименте подавали 20 тестовых сигналов, что позволяет говорить о статистически корректных результатах. При нагреве свыше 600 °С в материале начал интенсивно протекать процесс пластического деформирования, что зафиксировано АЭ системой, после чего процесс нагрева был остановлен.

Исследование показало, что в диапазоне нагрева до 350 °С акустические характеристики материала остаются практически неизменными, затем происходит уменьшение амплитуд принятых

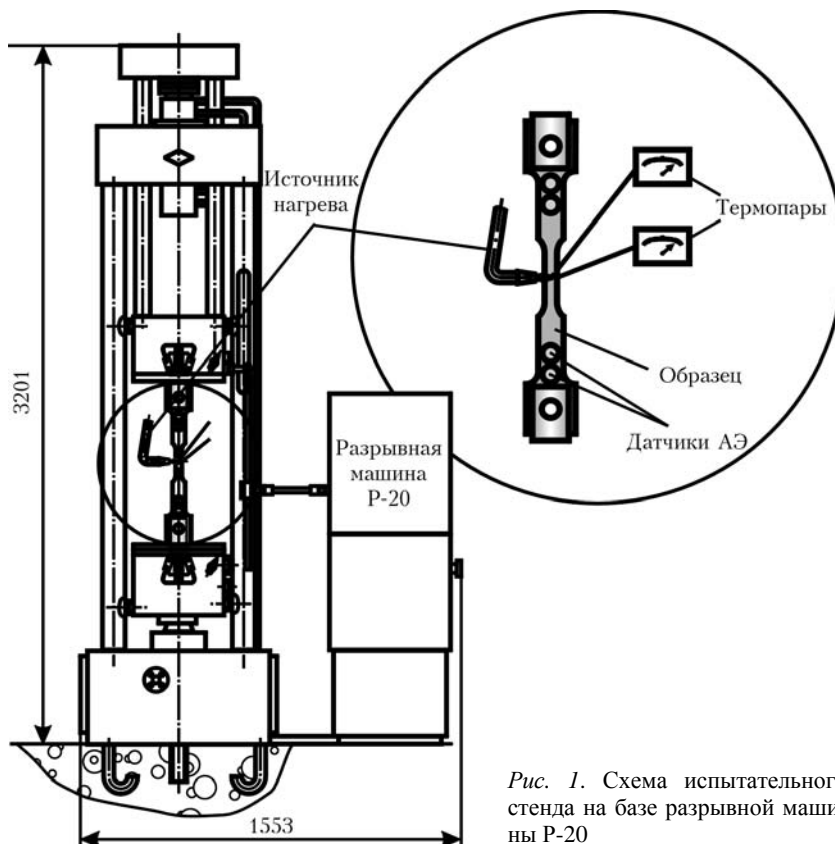


Рис. 1. Схема испытательного стенда на базе разрывной машины Р-20



Таблица 1. Свойства исследованных материалов в исходном состоянии

Материал	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\psi$ , %	$\delta$ , %	Тип образца
Ст3	220	400	25	72	АЭ-01Р
Сталь 20	288	440	28	34	АЭ-01Р
15Х1М1Ф	376	545	55	21	Круглый
X18H10T	285	560	55	71	»»

датчиками сигналов (на рис. 3 представлены усредненные данные для двух датчиков АЭ). Характерным является также снижение скорости прохождения волны через материал (на рис. 4 — усредненные данные для двух датчиков АЭ). Скорость определяли по задержкам времени прихода волн АЭ на первый и второй датчики, учитывая, что расстояние между ними известно.

Дополнительная проверка полученных результатов выполнена с использованием другого имитатора сигналов АЭ — ломающегося графитного стержня. Такая процедура часто используется при калибровке АЭ систем. Результаты аналогичны представленным выше, но следует отметить меньшую точность такого метода, поскольку излом стержня осуществляли вручную.

При испытаниях на статическое растяжение регистрировали температуру в рабочей части образца, нагрузку и акустическую эмиссию. Для материалов, показавших низкую акустическую активность при высоких температурах, были проведены испытания при нормальной температуре. Дополнительно проводили испытания образцов со сварными соединениями. В процессе испытаний проверяли также алгоритм прогноза разрушающей нагрузки АЭ системы ЕМА-3 в условиях различной акустической активности.

Рассмотрим некоторые результаты проведенных исследований. Для примера приведем вид экрана программы ЕМА-3 после окончания испытания стали 20 (рис. 5), на котором представлена локационная антенна, некоторые графики процесса испытания и результаты окончательного прогноза разрушающей нагрузки. В данном случае прогноз программой был выполнен, но для неко-

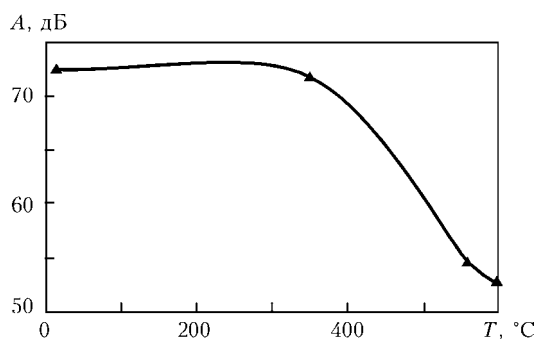


Рис. 3. Изменение амплитуд сканирующих АЭ сигналов в зависимости от температуры нагрева пластины

торых материалов полученной АЭ информации было недостаточно. В верхней части окна расположена область прогноза разрушающих нагрузок, ниже — отображение локационной схемы и координат событий АЭ. Справа — графики реального времени, количество которых и выбор отображаемых параметров осуществляет пользователь. Внизу — столбчатая диаграмма непрерывной АЭ по каждому измерительному каналу с отметкой установленных порогов. Во всех проведенных испытаниях данной серии использовали локационную схему из двух датчиков АЭ.

Белая полоса в нижней части локационной схемы предназначена для отображения координат событий АЭ столбиками синего цвета до их кластерного анализа. Столбец с флажком отображает результаты кластеризации с восстановлением истинных координат предполагаемого развивающегося дефекта — источника АЭ.

Для всех проведенных испытаний характерно возникновение АЭ в центральной части образцов, где впоследствии и происходило разрушение. Результаты кластеризации позволяют определить истинное место разрушения с погрешностью не более 5%. Испытанные материалы показали различную акустическую активность как в холодном, так и нагретом состояниях. Общим свойством, характерным для всех испытанных материалов, является снижение числа событий АЭ в условиях нагрева. Поэтому одной из целей анализа проведенных испытаний является определение возможности локации источников АЭ и прогнозирования разрушающих нагрузок при высоких температурах.

Наименее информативна сталь X18H10T. Следует учесть, что при испытаниях данного материала в условиях обычных температур возникает малое число событий АЭ, а имеющийся опыт АЭ исследований такого класса материалов показывает, что даже на стадиях образования и роста трещин они излучают крайне мало сигналов АЭ [1]. Особенно существенно этот факт сказывается при высокотемпературных испытаниях. Прочие стали при высокой температуре также существенным образом теряют акустическую активность, но

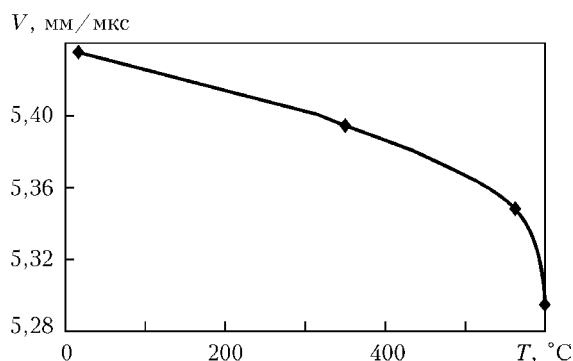


Рис. 4. Изменение скорости сканирующих АЭ сигналов в зависимости от температуры нагрева пластины

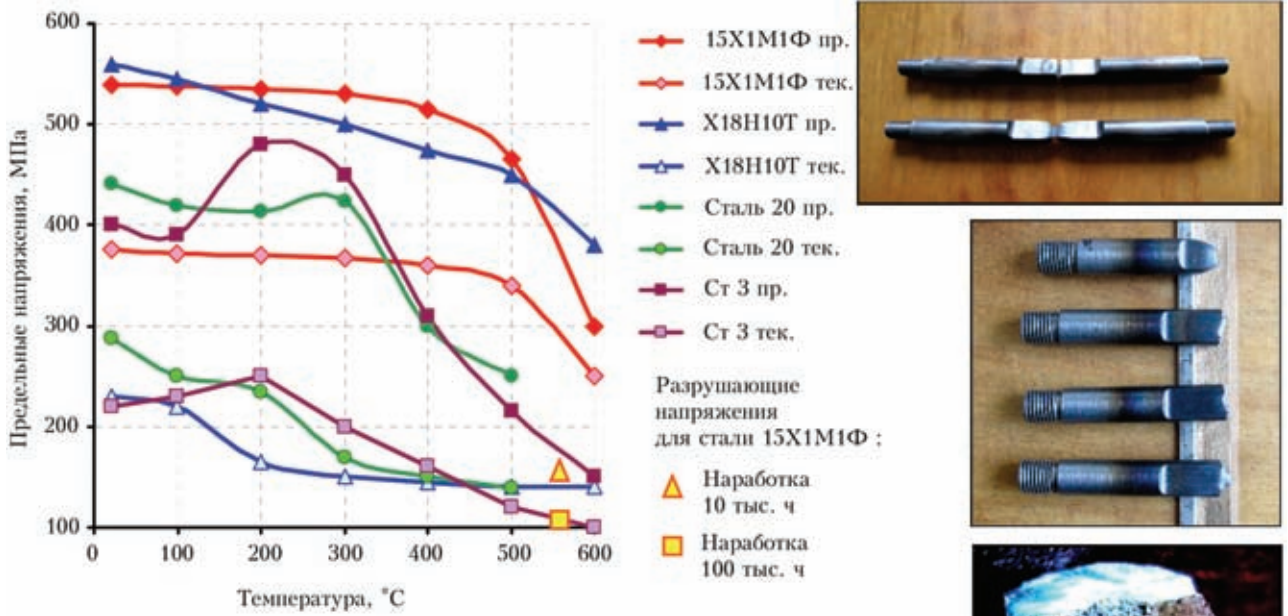


Рис. 2. Пределные напряжения в различных материалах при растяжении в зависимости от температуры. Для стали 15X1M1Φ приведены также разрушающие нагрузки после наработки 10 и 100 тыс. ч при температуре 560 °С. На фото — образцы для высокотемпературных испытаний до и после разрушения, а также типичная поверхность разрушения образцов



Рис. 5. Окно программы EMA-3.5. Испытание стали 20 при нормальной температуре

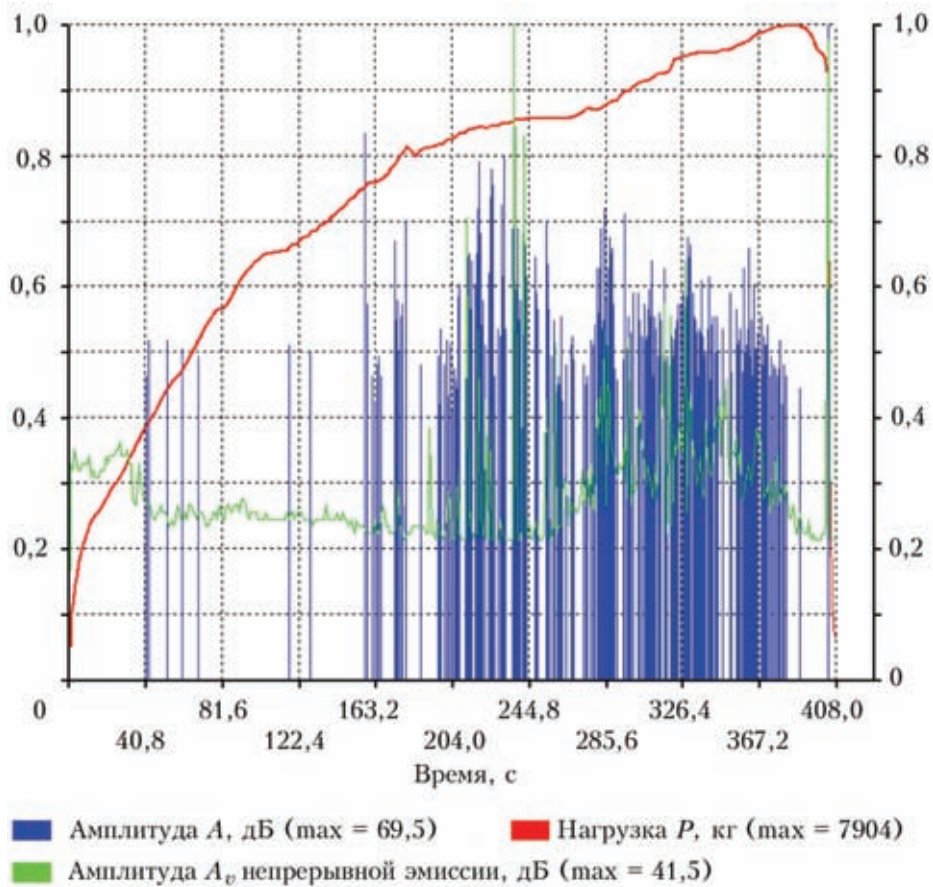


Рис. 6. Испытание стали Ст.3 при нормальной температуре

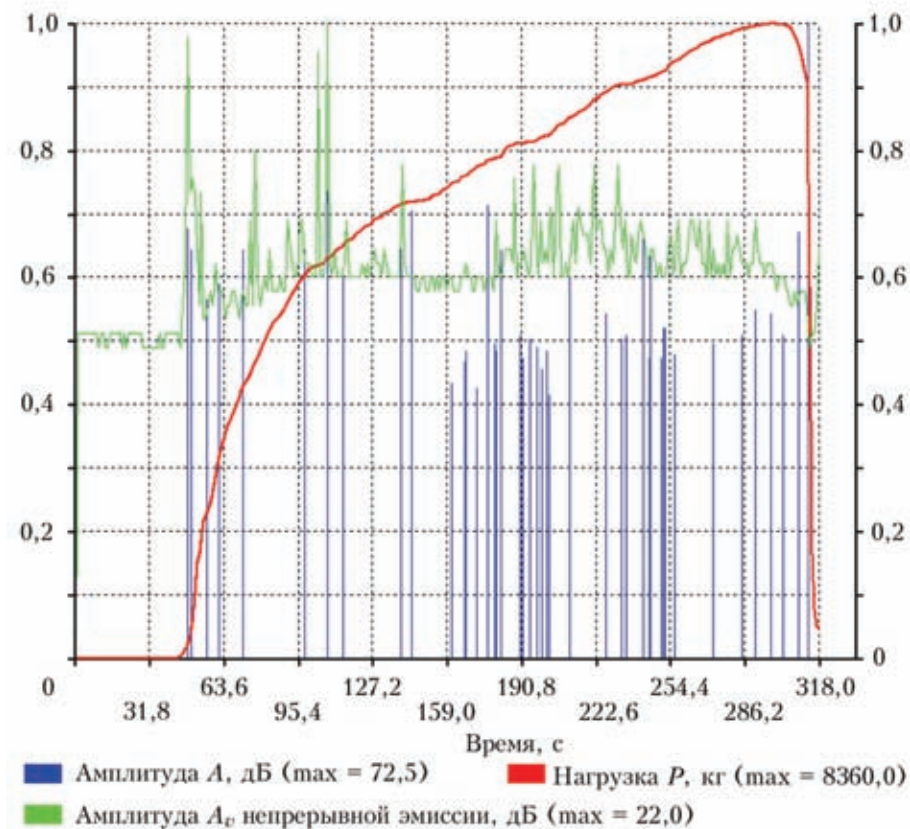


Рис. 7. Испытание стали 15X1M1Ф при нормальной температуре



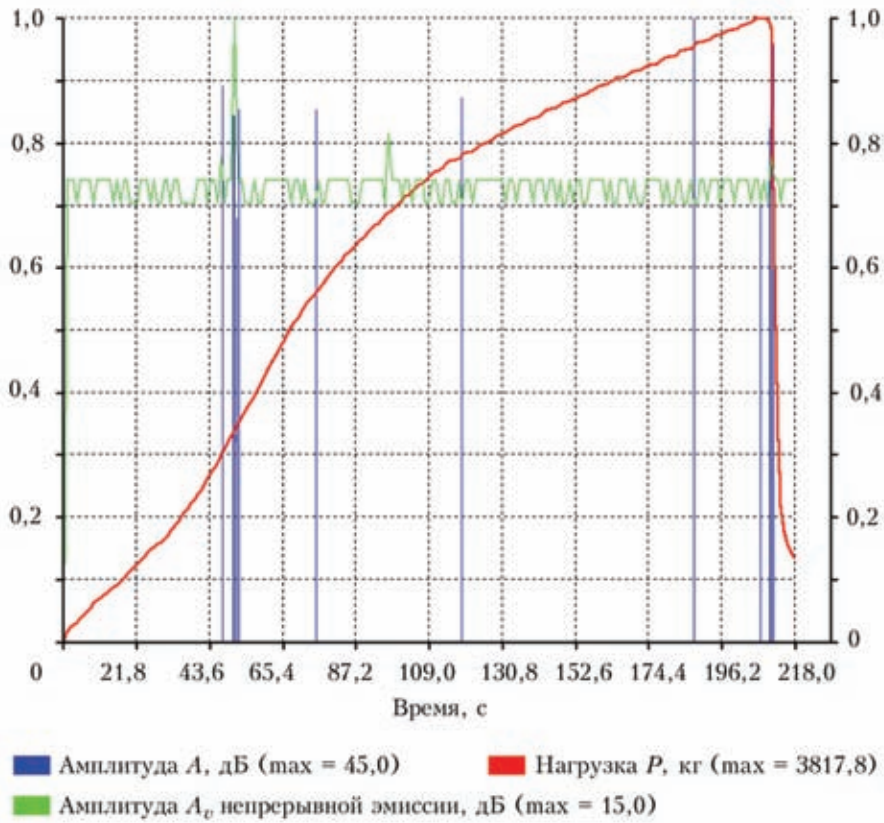


Рис. 8. Испытание стали X18N10T с надрезом при нормальной температуре

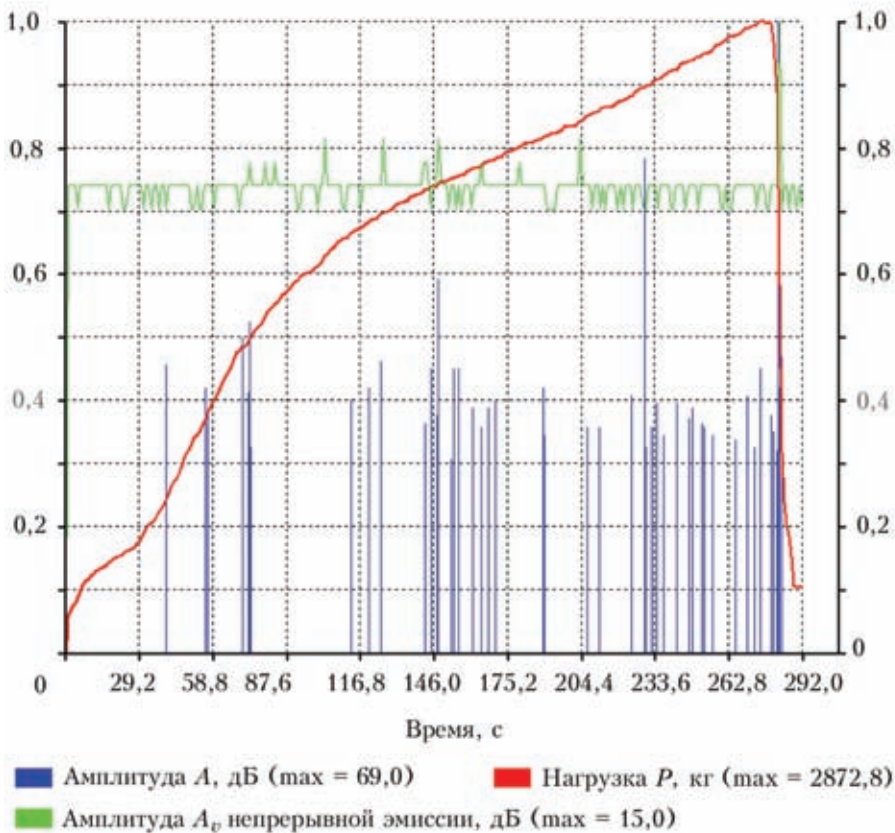


Рис. 9. Испытание стали X18N10T с надрезом при температуре 450 °С в режиме зонного контроля

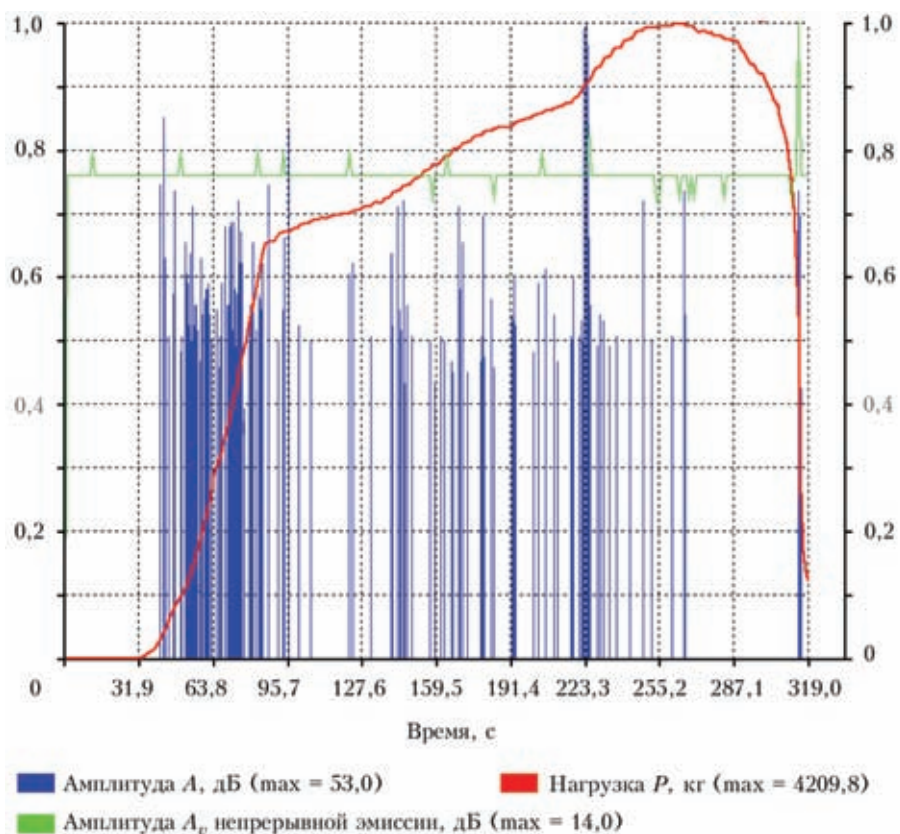


Рис. 10. Испытание стали 15X1M1Ф при температуре 500 °С в режиме зонного контроля

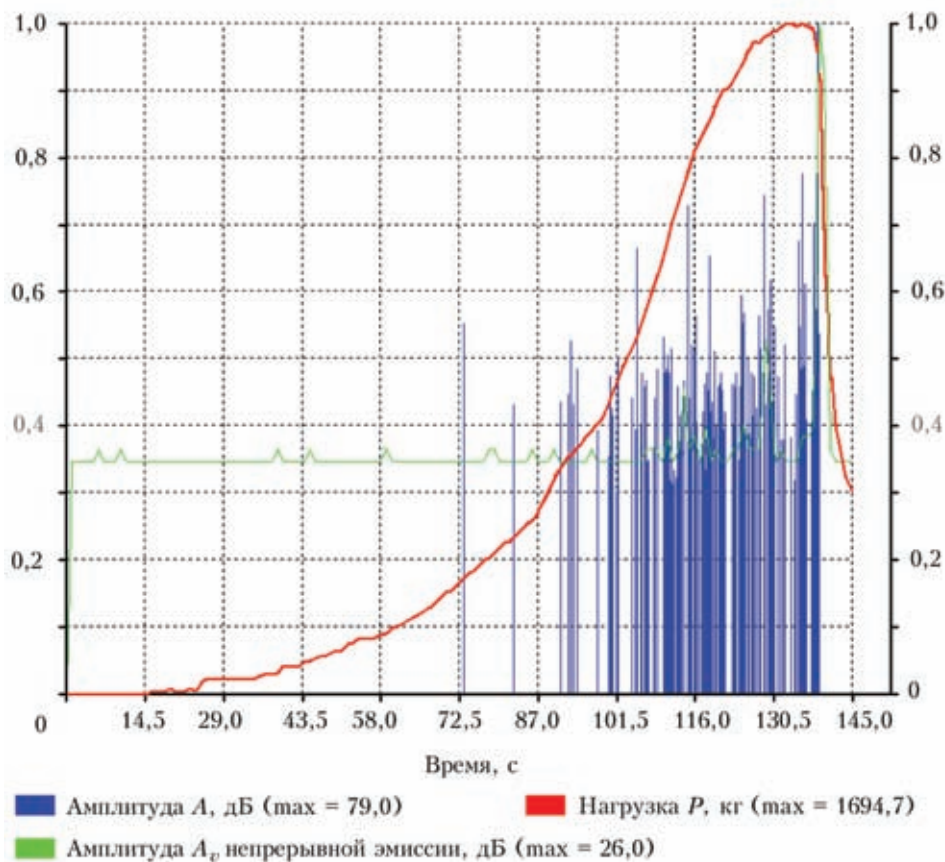


Рис. 11. Испытание стали 20 при температуре 450 °С. Образец со сварным швом



получаемой информации может быть достаточно для оценки состояния материала.

Испытания стали 15X1M1Ф при температуре 500 °С показали, что имеются некоторые потенциальные проблемы при регистрации АЭ с использованием традиционной схемы крепления датчиков. Возможно, сильный нагрев датчика, расположенного выше источника пламени, привел к потере им чувствительности, в результате чего количество принятых импульсов было во много раз меньше, чем принятых датчиком, расположенным ниже источника пламени. Еще одной вероятной причиной незначительного количества событий, формируемого системой по результатам срабатываний двух датчиков АЭ, может быть снижение акустической проводимости металла в диапазоне излучения сигналов внутренними дефектами. Проверка в начальный период испытания срабатываний датчиков от внешнего источника, имитирующего АЭ, показала нормальную работу датчиков. Таким образом, данный вопрос нуждается в более детальном исследовании.

В целом, установлены следующие общие закономерности. Наличие области концентрации напряжений (в данной работе создаваемой за счет надреза в центральной части образца) повышает информативность метода. Еще более информативным метод является для образцов со сварным соединением, наличие которого в большинстве случаев увеличивает акустическую активность в 10 и более раз.

Данные, приведенные в табл. 2 для некоторых испытанных образцов, показывают общую тенденцию снижения событий АЭ при высоких температурах.

Тем не менее, следует отметить, что даже при одном работоспособном датчике информации, принятой АЭ системой, может быть вполне достаточно для принятия решения о состоянии объекта контроля, работающего при данных температурных условиях.

Представим графики некоторых испытаний материалов в следующих координатах: по оси абсцисс — время от начала испытания, по оси ординат — три параметра (нагрузка — красная кривая, уровень непрерывной АЭ — зеленая, гистограмма синего цвета — амплитуды событий дискретной АЭ). Численные результаты испытаний приведены в табл. 3.

Образец из стали Ст3, испытанный в условиях нормальной температуры (рис. 6), разрушился при нагрузке 7904 кг.

Образец из стали 15X1M1Ф, испытанный в условиях нормальной температуры (рис. 7), разрушился при нагрузке 8360 кг.

Данные, приведенные в табл. 3 для образцов из этих сталей, показывают эффективность реализованной в программе ЕМА-3 технологии прог-

Таблица 2. Снижение числа событий АЭ при высоких температурах

Материал	Число событий АЭ по данным испытаний трех образцов каждой стали	
	при нормальной температуре	при температуре выше 450 °С
Сталь Ст3	439...512	43...57
Сталь 20	837...879	19...23
Сталь 20 со сварным швом	1121...1174	173...216
15X1M1Ф	1132...1151	217...298
X18H10T	10...17	3...5
X18H10T со сварным швом	179...240	63...70

ноза разрушающей нагрузки при оценке состояния материалов в условиях нормальных температур. Первое предупреждение о возможном разрушении стали Ст3 получено на 117 с, второе с более точным прогнозом разрушающей нагрузки — на 163 с, за 245 с до разрушения, что составляет менее половины общего времени испытания (408 с). Предупреждение о возможном разрушении стали 15X1M1Ф получено на 98 с, за 216 с до разрушения, что составляет около трети общего времени испытания (306 с).

Выполненный прогноз соответствует величинам реальных нагрузок и укладывается в пределы установленных для системы ЕМА-3 погрешностей: ±15 % с вероятностью 0,95.

Показательным является также то, при каком числе зарегистрированных событий АЭ осуществляется прогноз разрушения. Для принятия решения о состоянии материала системе ЕМА-3 достаточно в некоторых случаях менее 10 событий АЭ, обработанных предварительно методами кластерного анализа.

Аналогичные результаты получены и для других испытанных материалов, кроме стали X18H10T (см. табл. 2), для которой число событий АЭ даже при нормальной температуре настолько мало, что не позволяет выполнить полноценного прогноза разрушения. Для материалов такого типа актуальным является изучение вопроса об увеличении числа источников АЭ за счет внесения в конструкцию образца концентратора либо сварного соединения, что и было выполнено.

Вначале были испытаны образцы с боковым двухсторонним сквозным надрезом в центральной части. Внесение данного концентратора в конструкцию образца привело (рис. 8) к трехкратному увеличению числа событий АЭ и, в результате, к корректному прогнозу разрушающей нагрузки (реальное разрушение произошло при нагрузке 3817,8 кг).

При температуре 350 °С и выше число событий АЭ существенно снижается и у некоторых материалов становится недостаточным для определе-



ния прогнозной разрушающей нагрузки. Здесь следует остановиться подробнее на принципе формирования событий в системе ЕМА-3. Под событием понимают результат близкого по времени срабатывания группы датчиков, ответственной за локацию АЭ в определенной области объекта контроля. Такая группа, позволяющая определить координаты источника АЭ сигнала по разнице времен прихода на различные датчики, называется локационной антенной.

В отличие от локации при помощи антенны так называемый зонный контроль основан на индивидуальной работе каждого датчика. Существенным преимуществом данного вида контроля является то, что он позволяет трактовать каждое срабатывание датчика как отдельное событие АЭ, а не объединяет в событие срабатывания всех входящих в антенну датчиков. При малом числе событий АЭ это иногда позволяет решить задачу прогноза, поскольку число событий увеличивается за счет такого технического приема минимум в два раза. Если же АЭ регистрирует преимущественно или только один датчик АЭ, при переходе к зонному контролю число зарегистрированных событий можно увеличить еще больше.

На рис. 9 приведен график испытания образца с поперечным надрезом из стали X18H10T при температуре 450 °С в режиме зонного контроля, за счет которого число событий удалось увеличить с 11 до 55, т. е. в 5 раз.

При этом события регистрируются практически на всех стадиях деформирования образца. Следует отметить и недостаток такого способа обработки АЭ данных: поскольку координаты событий АЭ в режиме зонного контроля не определяют, отбраковку технологических шумов, например,

связанных с работой системы нагружения, выполнить более сложно.

Указанный подход наиболее хорошо проявил себя применительно к стали 15X1M1Ф. Полученных в результате данных оказалось достаточно для того, чтобы в условиях нагрева до 500 °С корректно (с высокой вероятностью) спрогнозировать разрушение образца на самой начальной стадии при нагрузке 347 кг, т. е. менее 10 % от разрушающей (4209,8 кг). Видно (рис. 10), что при таком способе анализа АЭ информации высокая активность АЭ регистрируется уже на ранних стадиях нагружения, до достижения материалом пластичного состояния. Это представляется важным для контроля конструкций из данного материала, работающих в условиях высоких температур, и может послужить основой для создания соответствующих методов контроля.

Наиболее существенный вклад в увеличение числа событий АЭ, в том числе регистрируемых при высоких температурах, вносит сварка (см. табл. 2). При этом «заполненность» процесса нагружения событиями АЭ становится более равномерной (например, на рис. 11), что является хорошей предпосылкой для обнаружения развивающихся дефектов в конструкциях со сварными швами, работающих при высоких температурах, на различных, в том числе на ранних, стадиях деформирования.

Прогноз разрушения при таком числе событий АЭ корректен. В частности, образец, результаты испытания которого представлены на рис. 11, разрушился при максимальной нагрузке 1694 кг.

Обобщая полученные данные, можно отметить, что применительно к методу АЭ контролепригодность испытанных материалов различна. При высоких температурах метод АЭ наиболее

**Т а б л и ц а 3. Испытание образцо при нормальной температуре. Прогноз разрушения**

Время, с	Число событий АЭ	Текущее значение нагрузки, кг	Прогноз-минимум, кг	Прогноз-максимум, кг	Время до разрушения, с / разр. нагрузка, кг
<b>Сталь Ст3 при нормальной температуре</b>					
117	6	5206	10959	12047	291 / 7 904
163	11	6023	7830	9035	245 / 7 904
<b>Сталь 15X1M1Ф при нормальной температуре</b>					
98	7	5035	8392	9070	216 / 8360
<b>Сталь X18H10T с надрезом при нормальной температуре</b>					
52	7	1329	1901	3337	166 / 3818
188	10	3647	3101	3830	210 / 3818
<b>Сталь X18H10T с надрезом при температуре 450 °С</b>					
113	9	1903	2721	3673	179 / 2873
<b>Сталь 15X1M1Ф при температуре 500 °С</b>					
44	8	347	2748	4824	275 / 4210
<b>Сталь 20 при температуре 450 °С. Образец со сварным швом</b>					
117	67	1204	1390	1756	138 / 1695



чувствителен к развитию разрушения в стали 15Х1М1Ф, наименее чувствителен — в стали Х18Н10Т. Тем не менее, с применением дополнительных методических приемов даже в этом материале при высоких температурах методом АЭ может быть обнаружено развитие дефектов и выполнен прогноз разрушения.

### Выводы

Установлено изменение акустических характеристик исследованных материалов при повышении нагрева рабочей части образца свыше 350 °С. Нагрев приводит к уменьшению амплитуд тестовых сигналов и скорости АЭ в материале.

Состояние объектов, работающих при высоких температурах, может быть оценено при помощи метода АЭ для всех исследованных в настоящей работе классов материалов. Исключение составляет сталь Х18Н10Т, которая дает положительные результаты при наличии концентраторов напряжений.

Материал без дефектов или с незначительным их количеством с точки зрения проведения АЭ испытаний менее информативен при высоких температурах, и для определения состояния объектов контроля требуется высокая чувствительность измерительной аппаратуры и специальная методика измерений.

Для материала объектов с концентраторами напряжений, сварными соединениями или существенно развитыми дефектами АЭ испытания могут быть проведены с использованием стандартных методик.

При высоких температурах актуальной проблемой является обеспечение работы датчиков АЭ,

в связи с чем целесообразным представляется использование специальных волокон, снижающих температуру рабочего участка датчиков.

Выполняемый системой ЕМА-3 прогноз разрушающей нагрузки по данным АЭ зависит от объема получаемой АЭ информации. В тех случаях, когда ее недостаточно для принятия решения о состоянии объекта контроля, следует разрабатывать специальные приемы, позволяющие повысить информативность метода.

1. *Исследование АЭ характеристик материалов при высоких температурах. Сообщение 1* / Л.М. Лобанов, А. Я. Недосека, С. А. Недосека и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2009. — № 1. — С. 5–10.
2. *Особенности функционирования технологических трубопроводов при высоких температурах* / А. Я. Недосека, С. А. Недосека, О. И. Бойчук и др. // Там же. — 2009. — № 2. — С. 5–10.
3. *Березина Т. Г., Бугай Н. В., Трунин И. И.* Диагностирование и прогнозирование долговечности металла теплоэнергетических установок. — Киев: Техника, 1991. — 120 с.
4. *Недосека А. Я.* Основы расчета и диагностики сварных конструкций / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: Индпром, 2008. — 814 с.
5. *Недосека А. Я.* Техническая диагностика сварных конструкций / Машиностроение: Энциклопедия в 40 т. — Т. III–4. Технология сварки, пайки и резки / Под ред. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 2006. — С. 742–744.
6. *Недосека С. А.* Исследование кинетики разрушения металлов на заключительных стадиях деформирования методом акустической эмиссии: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Киев: Изд-во Ин-та проблем прочности, 1994. — 16 с.
7. *Стрижало В. А.* Циклическая прочность и ползучесть металлов при малоцикловом нагружении в условиях низких и высоких температур. — Киев: Наук. думка, 1978. — 238 с.
8. *Механические свойства металлов и сплавов* / Л. В. Тихонов, В. А. Кононенко, Г. И. Прокопенко, В. А. Рафаловский. — Киев: Наук. думка, 1968. — 468 с.



# МЕТОДОЛОГІЯ АКУСТИКО-ЕМІСІЙНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ МОСТОВИХ КОНСТРУКЦІЙ

З. Т. НАЗАРЧУК, В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ

*Подано методологічні аспекти проведення АЕ-діагностування залізобетонних елементів мостових конструкцій. В їх основу закладено теоретико-експериментальні результати, отримані під час досліджень різних механізмів зародження та розвитку руйнування бетону та залізобетону у лабораторних умовах випробувань та під час апробації створених методик на реальних об'єктах довготривалого експлуатування. Приведено методичні рекомендації застосування створених методологічних підходів для діагностування таких об'єктів.*

*Procedural aspects of performing AE diagnostics of concrete elements in bridge structures are presented. They are based on theoretical-experimental results, obtained during investigation of various modes of fracture initiation and development in concrete and reinforced concrete under laboratory testing conditions and during validation of the developed procedures on actual long-term operation facilities. Procedural recommendations are given as regards application of the developed methodological approaches for diagnostics of such facilities.*

В Україні налічується понад 16300 мостів загальною довжиною понад 400 км на державних та місцевих дорогах, близько 4100 комунальних та 8050 залізничних мостів протяжністю, відповідно, 200 та 210 км [1]. Найпоширенішими серед них є залізобетонні мости — 91,5 % загальної кількості, металеві — 6 %, кам'яні та дерев'яні — 2,5 %, відповідно; 85 % залізобетонних мостів складаються зі збірних конструкцій за типовими проектами.

Бетонні та залізобетонні мости в Україні почали будувати на початку ХХ ст. Це були монолітні мости малих та середніх прогонів плитної (довжиною 2...6 м) та ребристої (10...15 м) конструкцій [1]. Вони характеризуються великим розкидом характеристик використаних матеріалів: бетон класу В10...В25, арматура гладка зі сталі Ст3 чи періодичного профілю Ст5.

З середини 1950-х років почався інтенсивний перехід до збірного будівництва мостів, що дозволило скоротити строки будівництва та покращити якість елементів прогонової будови. Для будівництва малих та середніх мостів використовували плитні, плитно-ребристі та коробчаті конструкції прогонових будов.

Проте саме використання збірного залізобетону призвело до незадовільного стану цих мостів сьогодні. Пов'язано це з тим, що будь-яка збірна конструкція на стадії будівництва об'єднується у єдину систему за допомогою стиків зі сталевих елементів або монолітного залізобетону. Експлуатація таких конструкцій упродовж 30...40 років показала, що саме стики є основним недоліком збірних конструкцій і руйнівні процеси починають розвиватися саме з цих місць. Окрім цього, для збірних конструкцій дуже важливим елементом є проїзна частина, яка повинна захищати про-

гонові будови від вологи. Існуюча конструкція проїзної частини передбачає термін експлуатації у 5-6 разів менший, ніж прогонова будова і за цей час, згідно регламенту експлуатації, вона повинна пройти належні ремонти, а то й заміну. Ці роботи практично не виконують, тому зараз на більшості таких мостів проїзна частина перебуває у жалюгідному стані, що сприяє зростанню пошкодженості самої прогонової будови.

У 1960-х рр. з'явилися діафрагмові прогонові будови з попередньо напруженою арматурою у вигляді пучків з натягом на упори для прогонів 12,5; 15 та 20 м [3, 4]. Таких прогонових будов в Україні налічується близько 4 % [1].

Найрозповсюдженіші діафрагмові струнобетонні прогонові будови (до 17 % загальної кількості) довжиною прогонів у проясненні 10, 15 та 20 м з балками, армованими напруженою на упори арматурою з високоміцного дроту діаметром 3...5 мм у вигляді струн [5, 6]. Струнобетонні балки виявилися недовговічними в експлуатації. Недотримання під час виготовлення балок товщини захисного шару бетону, замокання балок і схильність сталі високоміцного дроту до корозії спричиняють швидке кородування робочої арматури малого діаметра і обривання струн. В деяких мостах зафіксовано спонтанне руйнування струнобетонних балок [7].

Основним недоліком плитних конструкцій прогонових будов є шпоночні шви між плитами, які якісно не виконують під час будівництва, що призводить до їх розкриття, а відтак до протікання через них води та вилуговування бетону. Невдалим конструктивним рішенням було застосування для напруженого армування високоміцного дроту, оскільки ще під час його натягу і бетонування струни обриваються, що зменшує несучу здатність балки.



В таких конструкціях відбувається дуже активно корозія під час зволоження чи замокання балок.

Поряд з незаперечними перевагами над іншими конструкційними матеріалами залізобетон має і свої недоліки. Вони зумовлені як самою природою формування матеріалу, так і сутністю незворотніх процесів під час монтажу та експлуатації. На даний час велика кількість таких елементів конструкцій мають значні дефекти або перебувають в незадовільному технічному стані, що вимагає їх негайної заміни або постійного моніторингу. Тому створення акустико-емісійних (АЕ) методик кількісної оцінки ранніх стадій зародження та розвитку руйнування у таких конструкціях дають змогу визначати технічний стан елемента чи споруди в цілому, встановити місця зародження та розвитку руйнування, а періодичний АЕ-моніторинг дозволить попередити руйнування конструкцій ще на етапі його зародження та розвитку.

**Обґрунтування вибору типу модельної балки для лабораторних досліджень.** У зв'язку з великою різноманітністю видів та типів залізобетонних елементів, які використовуються у будівництві мостів, нами була вибрана для дослідження типова залізобетонна балка прогонової будови. Вона є найнавантаженишим несучим елементом мостових конструкцій і тому представляє найбільше зацікавлення з точки зору їх технічного діагностування. Оскільки геометричні параметри реальної балки не дозволяють проводити її випробування у звичайних лабораторних умовах, то для оптимізації геометричних параметрів лабораторного зразка ми використали теорію подібності та моделювання [8].

Головними параметрами подібності були вибрані такі критерії: матеріал, довжина  $L$ , висота  $H$ , модуль пружності  $E$ , жорсткість балки під час згину  $D_{zg}$ . Для визначення числа критеріїв подібності скористаємося  $\pi$ -теоремою. Оскільки матеріал та модуль пружності  $E$  для природи та моделі є незмінним, розглянемо випадок фізичного моделювання, де  $\pi = N - n = 5 - 2 = 3$ :

$$\pi_1 = \frac{L^H}{L^M} = \text{idem}, \quad \pi_2 = \frac{H^H}{H^M} = \text{idem}, \quad \pi_3 = \frac{D_{zg}^H}{D_{zg}^M} = \text{idem},$$

де індекси «н» та «м» означають величини, які відносяться до природи і моделі, відповідно.

**Таблиця 1. Параметри подібності природи та моделі**

Параметр	Природна балка	Модельна балка	Масштабний коефіцієнт лінійних розмірів $m_l$
$L$ , см	866	90	9,6
$H$ , см	70	10	7
$D_{zg}$ , см <sup>4</sup>	$7,5 \times 10^4$	583	6

Жорсткість балки під час згину визначали за залежністю:

$$D_{zg} = \sum [E_i(I_x^i + A_i a_i^2)], \quad (1)$$

де  $E_i$  — модуль пружності  $i$ -го шару перерізу;  $I_x^i$  — момент інерції  $i$ -го шару перерізу відносно його центральної осі;  $A_i$  — площа  $i$ -го шару перерізу;  $a_i$  — відстань від центру ваги  $i$ -го шару до центра ваги перерізу балки.

Позначимо через  $m_l$  масштабний коефіцієнт лінійних розмірів. Тоді для подібності природи та моделі справедливі залежності:

$$L^H = m_l L^M, \quad H^H = m_l H^M, \quad D_{zg}^H = m_l^4 D_{zg}^M. \quad (2)$$

У праці [8] визначено вплив діафрагми на жорсткість балки. Розрахунки показали, що різниця жорсткостей балок з діафрагмою та без неї становить приблизно 3 %, тому діафрагми ми не використовували під час виготовлення модельної балки. Для проведення досліджень у лабораторних умовах з урахуванням теорії подібності та моделювання, були вибрані відповідні геометричні параметри модельної балки (табл. 1).

Як видно з табл. 1, значення  $m_l$  має незначний відхилення і є одного порядку з іншими параметрами природи, тому конструкція моделі відповідає основним критеріям теорії подібності та моделювання.

**Розрахунок модельної залізобетонної балки на міцність.** Модельні залізобетонні балки для лабораторних досліджень розмірами  $70 \times 100 \times 900$  мм<sup>3</sup> виготовляли із бетону у складі: гідравлічне в'язуче — портландцемент марки 500, дрібний заповнювач — пісок з модулем крупності  $M_k = 1,784$ ; крупний заповнювач — щебінь з фракціями  $5 \dots 10 + 30 \% 2,5 \dots 5$ . Співвідношення цемент:пісок:заповнювач (в об'ємних долях) — 1:1:1,8 та з водоцементним співвідношенням 0,4.

Каркас балок складався з робочої арматури діаметром 12 мм класу А-III довжиною 890 мм. У крайніх третинах (за довжиною) модельної балки було забезпечено поперечне армування арматурою діаметром 3 мм класу Вр-1 довжиною 80 мм з кроком 50 мм, загальна кількість стрижнів 14 шт. Верхнє армування виконане з двох стрижнів діаметром 3 мм класу Вр-1 довжиною 31,5 мм. Конструкція досліджуваної балки і схема армування приведена на рис. 1. Основні характеристики робочої арматури зі сталі 35ГС наступні: діаметр арматури 12 мм, площа поперечного перерізу  $A_s = 1,313$  см<sup>2</sup>, модуль пружності  $E_s = 20,6 \times 10^4$  МПа, межа міцності  $\sigma_B = 621$  МПа, межа плинності  $\sigma_T = 436$  МПа.

Попередньо експериментально було встановлено значення міцності кубів розмірами  $100 \times 100 \times 100$  мм із досліджуваного складу бето-

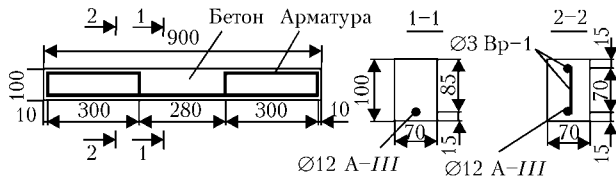


Рис. 1. Конструкція модельної залізобетонної балки

ну за методиками згідно [10]. Отримана у такий спосіб міцність бетону на стиск становила  $R_b = 41,5$  МПа.

Теоретичні розрахунки балки на міцність проводили наступним чином. Виходячи із конструкції модельної балки та схеми її навантаження триточковим згином, розраховували основні силові та деформаційні параметри: згинальний момент  $M$  та стрілу прогину  $f$  в середині прогону балки. Розрахунковий момент становив:  $M = bh_0^2 R_b \xi (1 - 0,5\xi) = 5,29$  МПа, де  $b = 70$  мм і  $h_0 = 85$  мм — робочі ширина і висота перерізу модельної балки, відповідно, коефіцієнт  $\xi = x/h_0$ . Змінну  $x$  визначали як  $x = R_s A_s / R_b b$ , де  $R_s$  — нормативний опір розтягу арматури, який дорівнював  $R_s = 390$  МПа. Теоретично визначена допустима величина руйнуючої сили  $P_{\max}$  (без урахування власної ваги) становила  $P_{\max} = 4M/l_0 = 26,5$  кН.

Розрахунковий максимальний прогин в середині прогону балки визначали методами будівельної механіки [11] і в нашому випадку його величина становила  $f = 4,3$  мм.

**Оцінка рівня амплітуд сигналів АЕ під час зародження та розвитку руйнування у модельній залізобетонній балці.** Залізобетонні модельні балки I (рис. 2, б) навантажували на випробувальній установці 10 типу УМЭ-10ТМ зусиллям, що передавали через тензOMETричний динамометр 8. Для відбору сигналів АЕ (САЕ) на боковій поверхні зразка I через шар акустико-прозорого мастила встановлювали первинні п'єзопретворювачі (ПАЕ) 2 і фіксували їх резиновою струбицею із зусиллям притискання 3...5 Н. Електричні САЕ із квазірезонансного ПАЕ 2 поступали на попередній підсилювач 3 із постійним значенням коефіцієнта підсилення 34 дБ, а далі

— на блок фільтрів високих і низьких частот 4, вимірювальний підсилювач потужності 5 і на блоки обробки САЕ 6 АЕ-приладу АВН-3. Підсилювали САЕ у смузі частот 0,1...0,5 МГц. Блок основного вимірювального підсилювача 5 давав можливість ступінчато підбирати коефіцієнт підсилення з кроком 1 та 10 дБ, а коефіцієнт передачі фільтрів був близьким до 1. Загальний коефіцієнт підсилення АЕ-тракту становив 88 дБ. Із блоку обробки САЕ 6 електричні сигнали в аналоговому виді поступали на швидкодіючий реєстратор 7 типу Н-338/6, де записували огинаючу САЕ за період 0,1 мс, їх сумарний рахунок  $N$ , зусилля навантаження  $P$  та переміщення  $f$ , а також САЕ з паралельного АЕ-каналу завод приладу АФ-15, який мав налаштування чутливості аналогічне, що й вимірювальний канал. Аналогові електричні сигнали з тензOMETричного динамометра сили 8 подавали на реєстратор 7 через підсилювачі постійного струму 9 типу У7-1.

Як показав аналіз експериментальних даних, під час руйнування модельних залізобетонних балок спостерігали чотири характерні ділянки зміни кривої  $f - \Sigma A_i$  (рис. 3, а). Так, на ділянці I ( $P = 0...3,8$  кН,  $f = 0...1,4$  мм) генерувалися САЕ з амплітудами 0,5...2,0 у.о.; на II — характер наростання суми амплітуд змінювався ( $P = 3,8...17$  кН,  $f = 1,4...3,2$  мм,  $A = 3,5...7,0$  у.о.). Ця ділянка відрізнялася тим, що за навантаження 3,8 кН на акустограмі з'являлися САЕ з амплітудами 4...5 у.о. (рис. 3, б).

Візуально перші тріщини на боковій поверхні балки вдалося виявити за навантаження  $P = 13$  кН (рис. 3, в). Під час наближення навантаження до 14 кН характерні амплітуди САЕ збільшувалися до 8 у.о. На ділянці III ( $P = 17...30$  кН,  $f = 3,2...3,5$  мм) крива  $f - \Sigma A_i$  різко змінює характер наростання, а на акустограмі спостерігаються САЕ вже з амплітудами 10...12 у.о. Візуально спостерігається поява об'єднання макротріщин (МТ) в похилу магістральну тріщину (рис. 3, в). На закритичній ділянці IV змінюється характер кривої  $f - \Sigma A_i$  та генеруються САЕ з амплітудами 15...20 у.о.

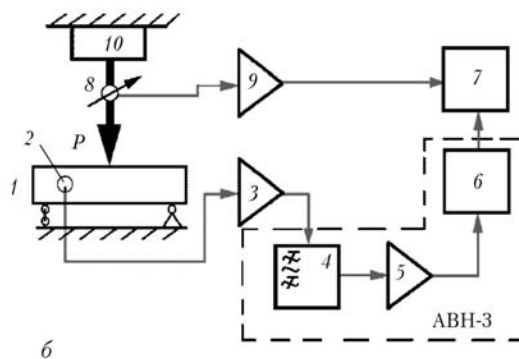


Рис. 2. Загальний вид устаткування (а) та схема експериментальних випробувань (б)



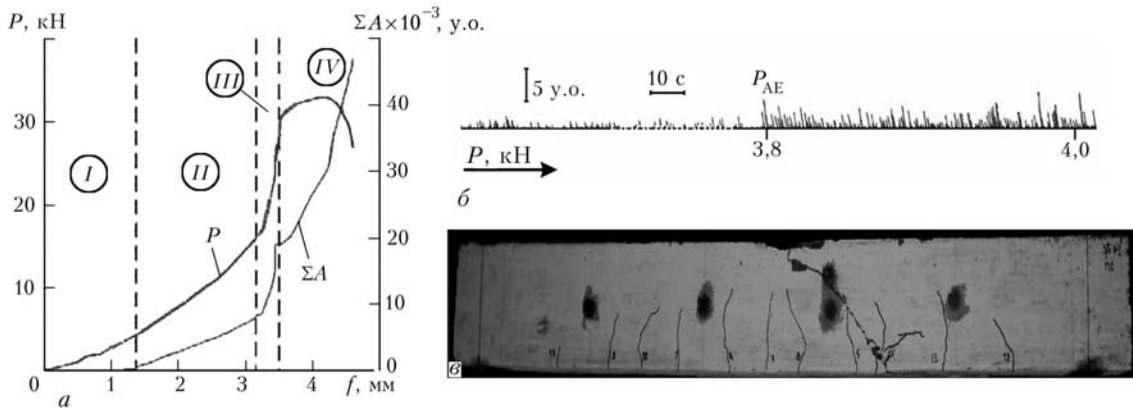


Рис. 3. Залежність суми амплітуд САЕ, зусилля навантаження  $P$  від прогину  $f$  (а), характерні амплітуди САЕ в діапазоні навантаження 3,6...4,0 кН (б), вид та розташування макротріщин у на боковій поверхні модельної балки після руйнування (в)

Якщо проаналізувати попередні експериментальні результати досліджень та отримані показники амплітуд САЕ від різних механізмів руйнування, то можна зробити такі гіпотетичні припущення: на ділянці I генеруються САЕ, що відповідають раннім стадіям зародження та розвитку мікротріщин у бетоні; під час появи на акустограмі САЕ з амплітудами 4,5 у.о. починається зародження та розвиток МТ у бетоні — ділянка II [12–16], а на III — генеруються САЕ від процесів поширення МТ у бетоні та відшарування арматури від бетону [17, 18].

**Оцінка старту МТ у модельній залізобетонній балці.** Визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень (КІН) старту МТ у модельній залізобетонній балці. Як видно з акустограм (рис. 3, б) та зміни характеру кривої  $f - \Sigma A_i$  (рис. 3, а та рис. 4), розвиток МТ припадає на навантаження 3,8 кН. Беручи до уваги результати праць [19, 20] стосовно стадій руйнування бетону, а також отримані нами амплітудні характеристики

САЕ, можна стверджувати, що поява на акустограмі сигналів з амплітудами 4,5 у.о. свідчить про початок розвитку руйнування — зародження і розвиток МТ. Перевірку цієї гіпотези здійснили таким чином.

Припускали, що зародження тріщиноутворення у залізобетоні розпочинається у його бетонній основі в місцях найбільших розтягуючих напружень. Для нашого випадку — у зоні дії максимального згинального моменту (рис. 5).

Для визначення силового критерію руйнування  $K_I$ , характерного для бетону класу В35 за наявних МТ, використали методику розрахунку, яка приведена у праці [21]. Найбільшими у такому бетоні є еліптичні тріщини з великою та малою осями 5 та 2 мм, відповідно, а критичне значення КІН для найпоширеніших тріщин становить  $K_{IC} = 0,68 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$  [22]. Таким чином, якщо припустити, що існує поверхнева напівеліптична або півдискова МТ в нижній частині балки в зоні найбільших розтягуючих напружень (рис. 5), то виникає необхідність визначити, за яких розмірів почне розвиватися така тріщина.

Згідно [21] КІН знаходили за допомогою методу граничної інтерполяції (рис. 6):

$$K_I = \sigma \frac{\sqrt{\pi a}}{E(k)} (\cos^2 \theta + \Lambda^2 \sin^2 \theta)^{1/4} \times M_{1,2}(\beta_1, \Lambda) F_1(\beta_1, \theta) F_L \quad (3)$$

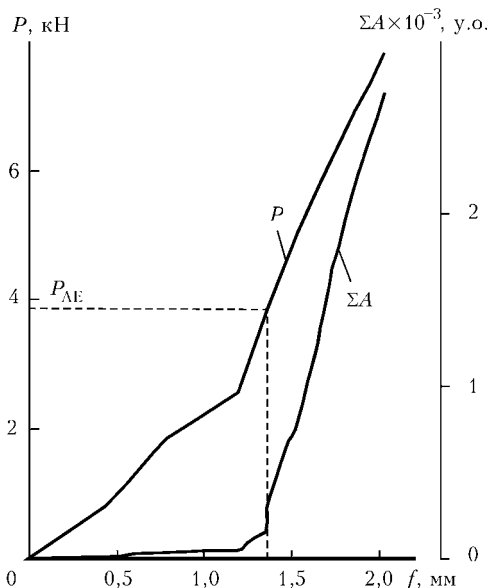


Рис. 4. Залежність зміни суми амплітуд САЕ  $\Sigma A_i$  та зусилля навантаження  $P$  від стріли прогину  $f$

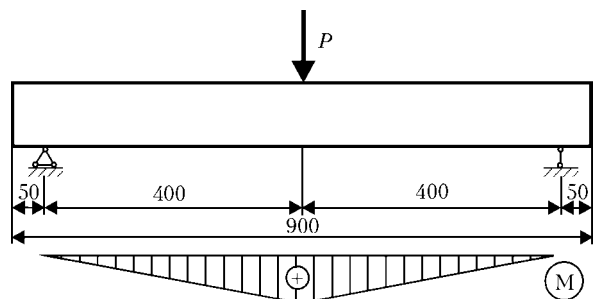


Рис. 5. Схема навантаження модельної балки триточковим згинном та епюра згинального моменту

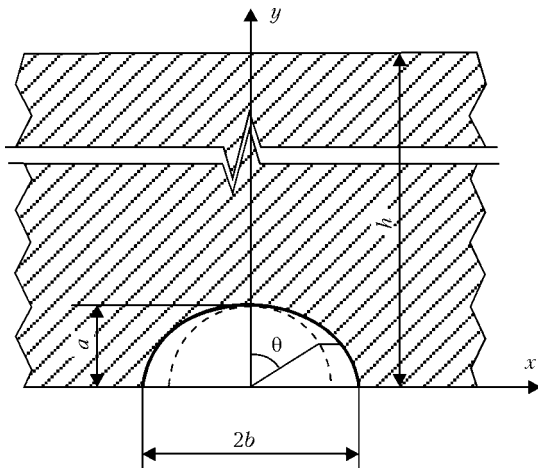


Рис. 6. Схема розташування поверхневої півеліптичної тріщини

де  $E(k)$  — повний еліптичний інтеграл 2-го роду;

$$\Lambda = \frac{a}{b}; \beta_1 = \frac{a}{h}; F_L = 1 + \beta_1^2 b^2 / L^2;$$

$$M_{1,2} = \left\{ 1 - \left( 1 - \frac{M_1 \sqrt{\Lambda}}{E(k)} \right) \exp \left[ \frac{-1,48 \beta_1^2}{(1 + 6\Lambda^3)} \right] \right\} \times \frac{E(k)}{\sqrt{\Lambda}}$$

Тут

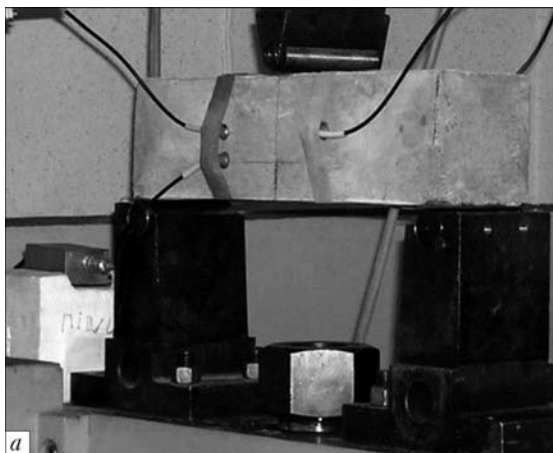
$$F_1(\beta_1, \theta) = 1 + (0,1 + 0,53\beta_1^3) \frac{8\theta^3}{\pi^3}, k^2 = 1 - \Lambda^2,$$

$$M_1 = 1 + 0,12(1 + \Lambda^2)^{-1}.$$

Напруження  $\sigma$  визначали як

$$\sigma = \frac{My}{I}, \tag{4}$$

де  $y = h/2$ ;  $h = 100$  мм — висота перерізу модельної балки;  $I = xh^3/12$  — момент інерції;  $x = 2L = 70$  мм — ширина балки;  $M = Pl_0/4$  — згинальний момент в середині прогону балки;  $l_0 = 800$  мм — відстань



Таблиця 2. Значення  $K_I$  в залежності від розмірів та типу МТ

Вид тріщини	Геометричні розміри, мм		$K_I$ , МПа $\sqrt{м}$	
	$a$	$b$	Розрахунок за методикою [23]	З праці [24]
Півеліпс	1	2	0,364	0,608
	2	4	0,514	
	3	5	0,609	
Півдиск	1	1	0,309	
	1,5	1,5	0,378	
	2	2	0,437	
	3	3	0,535	
	4	4	0,617	

між опорами;  $P = P_{AE}$ . Тут  $P_{AE}$  — навантаження балки, за якого на акустограмі появляються дискретні САЕ значних амплітуд (момент початку росту МТ), визначасмо з акустограми, яку записували синхронно з початком навантаження.

Як показали розрахунки за відомою моделлю [21], під час досягнення навантаженням значення  $P_{AE} = 3,8$  кН у бетоні класу В-35 можуть досягатися різні значення  $K_I$ , в залежності від геометрії тріщини. Результати розрахунків КІН для різної геометрії та типу тріщин наведено у табл. 2.

Тепер постало питання уточнення критичних розмірів МТ, за яких починається їх розвиток у даному типі залізобетону. Для цього були проведені такі експериментальні дослідження.

Експериментальне визначення  $K_{IC}$  бетону класу В-35. Оцінювали  $K_{IC}$  за стандартною методикою, описаною у нормативному документі [25]. Бетонні призми з двома надрізами навантажували за схемою триточкового згину квазістатично із швидкістю переміщення траверси 0,05 мм/хв (рис. 7). Для зменшення тертя та забезпечення відповідних умов навантаження в місці дотикання призми з індентором та опорними частинами машини були встановлені спеціальні шумопоглина-

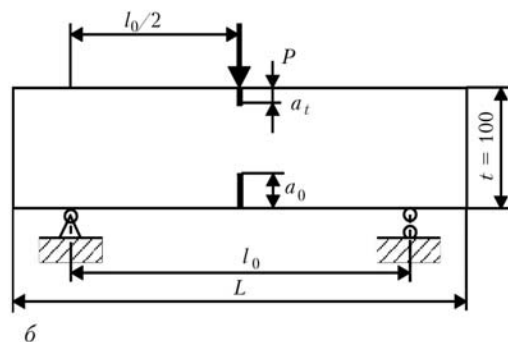


Рис. 7. Вид бетонної призми під час випробувань (а) та схема її навантаження (б)

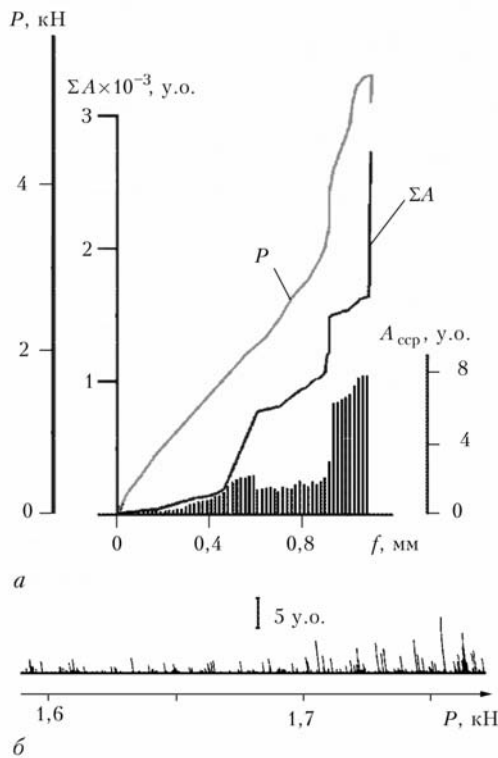


Рис. 8. Діаграма руйнування « $P$ - $f$ » та залежність суми і середніх значень амплітуд САЕ від стріли прогину  $f$  (а) і характерна акустограма на ділянці навантаження 1,6...1,75 кН (б)

ючі прокладки. ПАЕ через шар мастила встановлювали на боковій поверхні призми і кріпили за допомогою гумової стрічки із зусиллям притискання 3...5 Н. Бетонні призми були виготовлені з одного замісу, що і модельні залізобетонні балки, випробування яких описано вище. Надрізи створювали за допомогою встановлення пластин товщиною 2 мм під час заповнення дерев'яної опалубки бетонною сумішшю. Згідно [25] висота нижнього надрізу залежить від максимального розміру зерна заповнювача. Таким чином для бетону з щебінем фракції 5...10 висота нижнього надрізу становила  $a_0 = 35$  мм, верхнього  $a_t = 5$  мм (рис. 6, б).

Перед початком випробувань проводили два цикли навантаження–розвантаження зразків до зусилля, що відповідало близько 10 % максимального очікуваного його значення, яке становило 50 кН. Під час випробувань записували діаграму «зусилля навантаження  $P$  — прогин  $f$ » з одночасною реєстрацією САЕ. Налаштування АЕ-апаратури аналогічно описаним вище.

Характеристику статичної тріщиностійкості  $K_{IC}$  визначали за формулою:

$$K_{IC} = \frac{3l_0 P_c (\sqrt{a_0/b} (1,93 - 3,07\lambda + 14,53\lambda^2 - 25,11\lambda^3 + 25,8\lambda^4))}{2l^2 \sqrt{b}}, \quad (5)$$

де  $l_0 = 0,38$  м — віддаль між опорними частинами;  $a_0 = 0,035$  м — висота нижнього надрізу;  $b = 0,1$  м

— ширина перерізу призми;  $t = 0,002$  м — товщина надрізу;  $l = (a_0 + a_t)/b$  — відносна довжина початкового надрізу;  $a_t = 0,005$  м — висота верхнього надрізу;  $L = 0,4$  м;  $P_c$  — навантаження, яке відповідає початку старту МТ.

Результати випробувань показано на рис. 8.

Як видно з рис. 8, перша різка зміна характеру наростання кривої  $\Sigma A_i - f$  та значень амплітуд на акустограмі припадає на зусилля навантаження 1,72 кН. До наближення до цього зусилля різко зростає інтенсивність АЕ та починає генеруватися САЕ з амплітудами 3...6 у.о. Таке наростання інтенсивності та амплітуд САЕ свідчить про зародження і субкритичний розвиток МТ у бетоні. Тому для визначення  $K_{IC}$  значення розрахункового зусилля приймаємо  $P_c = P_{AE} = 1,72$  кН. Як випливає з розрахунків за формулою (3), тоді для нашого типу бетону КІН моменту старту МТ  $K_{IC} = 0,377$  МПа $\sqrt{м}$ .

Отже, ми отримали підтвердження того, що під час появи на акустограмі амплітуд САЕ зі значеннями 4,5 у.о. починається субкритичний розвиток півеліптичної тріщини, велика вісь якої становить 2 мм, мала 1 мм або півдискової радіусом 1 мм. Згідно зі статистичними даними, наведеними у праці [22], ці розміри, визначені за регламентованими класичними методами, мали б бути у 2...3 рази більшими (див. табл. 2). Отже метод АЕ дозволяє краще визначати старт МТ (стадія завершення зародження руйнування) у бетоні та залізобетоні.

**Вплив структури бетону і залізобетону та їх пошкодженості на зникання пружних хвиль АЕ.** Зникання пружних хвиль АЕ у бетоні та залізобетоні залежить від багатьох чинників, а його кількісні показники для кожного виду бетону суттєво відрізняються [26–29]. Тому постала проблема експериментального визначення коефіцієнта зникання пружних хвиль АЕ у бетоні та залізобетоні, які використовували для наших експериментальних досліджень. Встановлення значень цього показника (втрат енергії пружних хвиль АЕ під час їх проходження у цих матеріалах) має важливе практичне значення для проведення АЕ-діагностування елементів мостових конструкцій.

Визначали зникання пружних хвиль АЕ: у зразках розмірами 100×100×400 мм із бетону (Б) та для порівняння із цементно-пісочною сумішшю (ЦПС); у залізобетонних балках з наявними та без тріщин (ЗБт і ЗБ відповідно) розмірами 70×100×900 мм, а також у реальній залізобетонній трубі (Тр) довжиною 5 м та внутрішнім діаметром 1 м з товщиною стінки 0,1 м. Компоненти бетонної суміші та їх фізико-механічні характеристики для зразків з ЦПС були ж як і для залізобетонних балок з об'ємними долями «цемент:пісок» — 1:3; бетон типової залізобетонної

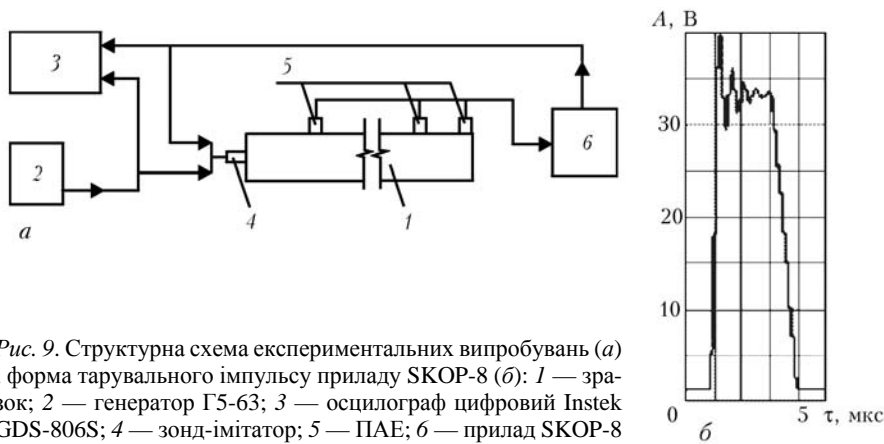


Рис. 9. Структурна схема експериментальних випробувань (а) і форма тарувального імпульсу приладу SKOP-8 (б): 1 — зразок; 2 — генератор Г5-63; 3 — осцилограф цифровий Instek GDS-806S; 4 — зонд-імітатор; 5 — ПАЕ; 6 — прилад SKOP-8

труби був класу В-25; армування — згідно нормативних документів [30, 31].

Такі типи зразків та матеріалів вибрано не випадково, а виходячи із поставлених у роботі експериментальних досліджень. Для встановлення впливу крупного заповнювача на зникання пружних хвиль АЕ використали зразки типів Б та ЦПС; тріщиноподібних дефектів у залізобетоні — зразки типів ЗБ і ЗБт, а геометричних розмірів — реальний виріб (зразок Тр). Принципову схему досліджень зникання пружних хвиль АЕ для всіх типів зразків приведено на рис. 9, а.

Імітували пружну хвилю у зразках 1 за допомогою восьмиканального АЕ-приладу 6 SKOP-8 (варіант I), джерела Гсу (варіант II) [32], а також генератора імпульсів 2 типу Г5-63 (варіант III). Імпульси з генератора 2 та АЕ-приладу 6 одночасно подавали на осцилограф 3 типу Instek GDS-806S, де записували форму сигналу, тривалість імпульсу  $T$ , його амплітуду  $A$  та період наростання сигналу  $\tau$ . Для відбору САЕ використовували серійні ПАЕ 5 типу П-113 із робочою смугою частот 0,2...0,6 МГц. ПАЕ 5 через акустопрозорий шар встановлювали на зразки за допомогою різьбового з'єднання у приклеєних на зразок пластинах. Робоча смуга частот АЕ-приладу 6 становила 0,2...0,8 МГц. Таким чином, у зразку 1 збуджували пружну хвилю різного походження, яку перетворювали ПАЕ 5 і передавали на АЕ-прилад 6, який реєстрував САЕ з періодом дискретизації

0,5 мкс, а значення порогу дискримінації при цьому становило 2,16 мВ. З приладу 6 також отримували і тарувальний імпульс (рис. 9, б) з максимальною амплітудою 38 В, тривалістю 5 мкс, а час наростання переднього фронту імпульсу становив 0,8 мкс (варіант I). На виході з генератора 2 тарувальний електричний імпульс мав прямокутну форму з амплітудами 5,2 або 14,8 В та тривалістю 2,5 мкс (варіант II).

З урахуванням геометричних розмірів для зразків типу Б і ЦПС використовували чотири ПАЕ (рис. 10, а), а для зразків типу ЗБ, ЗБт та Тр — 8 каналів відбору САЕ (рис. 10, б, в).

Як показали результати експериментальних досліджень, отримані експериментальні дані можна апроксимувати експоненціальною залежністю типу:

$$y = ae^{-\delta x}, \quad (6)$$

де  $\delta$  — коефіцієнт зникання;  $x$  — віддаль проходження хвилі;  $a$  — коефіцієнт апроксимації.

На рис. 11 показано характерні залежності зникання амплітуд пружних хвиль, імітованих джерелом Гсу у точці  $X$  для усіх типів зразків.

Як видно з наведених експериментальних даних, коефіцієнт зникання пружних хвиль АЕ для кожного виду матеріалу відрізняється суттєво. Так, для зразків Б і ЦПС він лежить у межах 2...2,4 та 4,3...5,3 м<sup>-1</sup>, відповідно; для зразків ЗБ і ЗБт — 3,3...4,5 та 5,6...6,3 м<sup>-1</sup>, відповідно, а для зразка

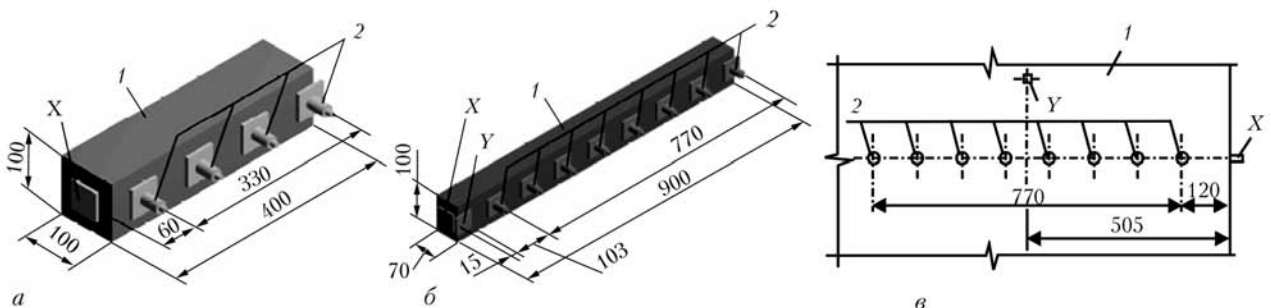


Рис. 10. Схема розташування ПАЕ на зразку типу Б, ЦПС (а); ЗБ і ЗБт (б) та Тр (в): 1 — зразок; 2 — ПАЕ; точки  $X, Y$  — місця імітування пружних АЕ-хвиль

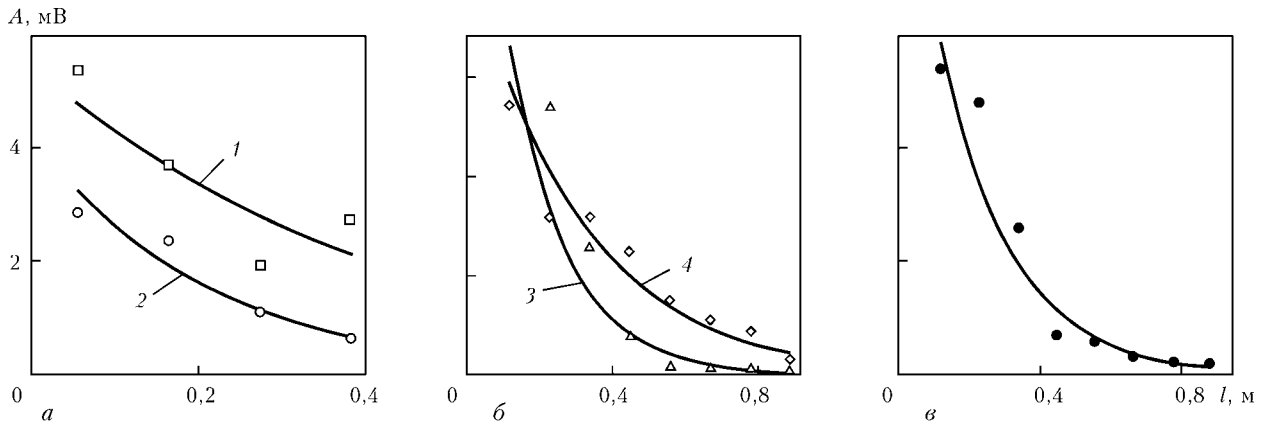


Рис. 11. Зникання амплітуд САЕ у призматичних зразках типів Б (крива 1); ЦПС (2); ЗБ (3); ЗБт (4) та у Тр (6)

Тр — 5,0...7,6 м<sup>-1</sup>. Отримані результати експериментальних досліджень наведено у табл. 3.

Для зразків із бетону домінуюча частота САЕ у їх спектральних характеристиках з віддаленням від точки імітації зміщується в область низьких частот та одночасно зменшується амплітуда. З віддаленням від джерела АЕ на спектрах з'являється яскраво виражене домінування низькочастотних складових, а також тенденція розширення спектра САЕ. Аналогічне прослідковується і для решти зразків та залізобетонної труби. Таким чином, урахувавши експоненціальний характер зникання пружних хвиль АЕ в таких матеріалах, можна констатувати, що зникання амплітуди пружної хвилі АЕ описується залежністю

$$A = A_0 a e^{-\delta R}, \quad (7)$$

де  $A_0$  — початкове значення амплітуди САЕ;  $R$  — віддаль від джерела АЕ до ПАЕ.

Якщо проаналізувати отримані результати, можна зробити висновок, що кожний з наведених вище факторів впливає на значення коефіцієнта зникання АЕ-хвиль. Так, наявність крупного заповнювача покращує умови проходження хвиль у 2...3 рази в порівнянні із ЦПС, наявність пошкоджень типу тріщин погіршує їх проходження у 1,4...2 рази в порівнянні з бездефектною балкою, а найбільший вплив на зникання мають геометричні параметри елементів об'єкта контролю.

**АЕ-діагностування моста через шлюз каскаду Київської ГЕС та ГАЕС. Методика й програма проведення випробувань.** Випробування прогнотних будов моста з використанням восьмиканальної вимірювальної АЕ-системи SKOP-8 здійснювали за статичного їх навантаження із реєстрацією при цьому характерних САЕ. Як вип-

Таблиця 3. Коефіцієнти апроксимації, кореляції та зникання пружних хвиль АЕ у бетоні та залізобетоні

Зразок	Місце імітації	Джерело імітації (варіанти)	Коефіцієнти			Зникання, дБ/м
			апроксимації $a$	зникання $\delta$ , м <sup>-1</sup>	кореляції $r$	
Б	X	I	5,6276	2,4275	0,7368	21,1
		II	3,6227	1,9874	0,9414	17,3
		III	5,4947	2,4378	0,6311	21,2
ЦПС	X	I	6,5268	5,2869	0,9487	45,9
		II	6,8111	4,2832	0,9999	37,2
		III	4,2522	4,8197	0,9572	41,4
ЗБ	X	I	7,2923	4,4730	0,9845	38,9
		II	8,6776	3,2909	0,9253	28,6
	Y	I	5,8646	3,9241	0,9743	34,1
		II	9,2320	3,3497	0,9162	29,1
ЗБт	X	I	9,4949	5,5499	0,9235	49,4
		II	13,976	6,3225	0,9182	54,9
	Y	I	7,8245	5,7091	0,9085	49,6
		II	12,743	6,2320	0,9172	54,1
Тр	X	II	2,3783	5,0429	0,9525	43,8
	Y	II	3,4332	7,5884	0,8312	65,8

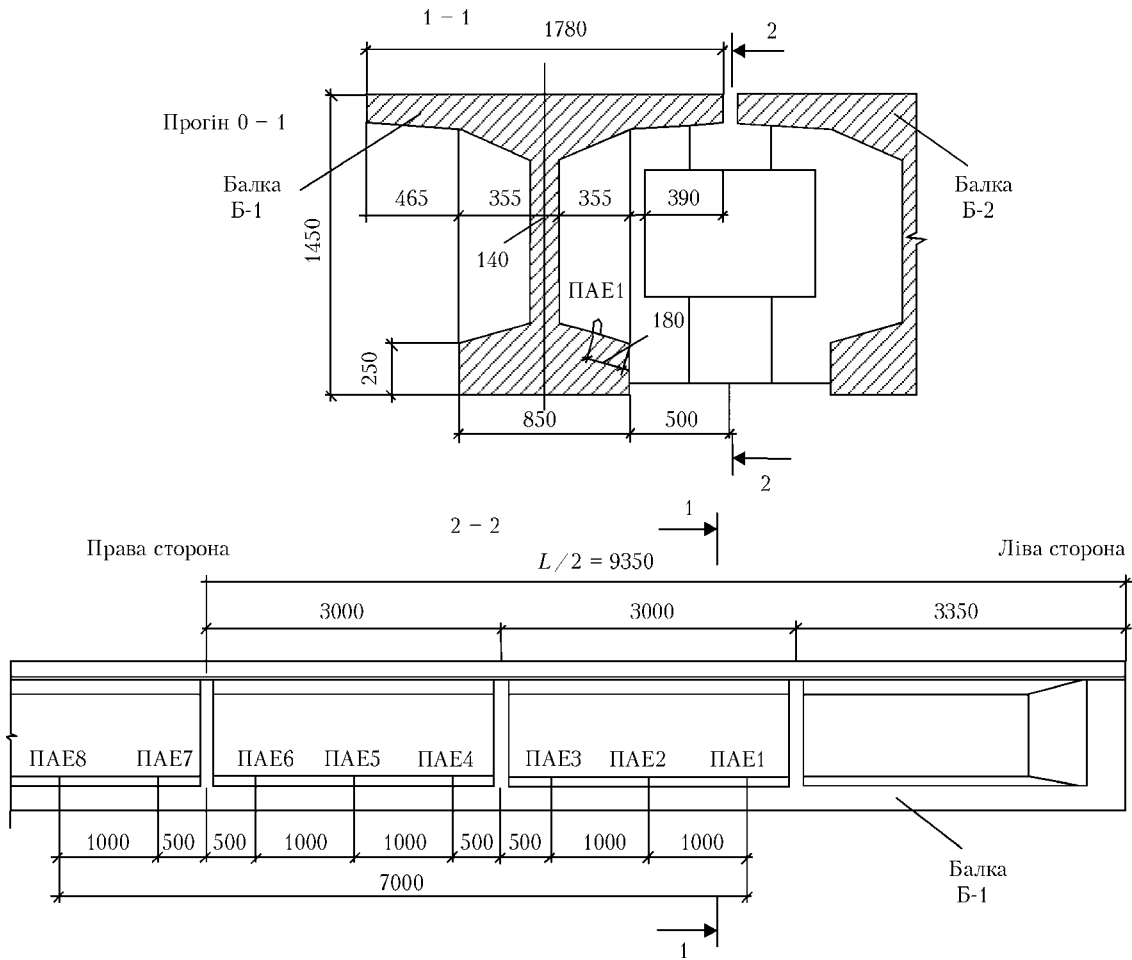


Рис. 12. Схема розташування ПАЕ на балці з низової сторони прогону 0-1

робувальне навантаження використовували 4 автомобілі КрАЗ вагою 21...24 т. Загальна вага автомобілів становила приблизно 90,3 т.

Діагностували першу балку Б-1 з верхової сторони прогону 0-1 за статичної силової схеми навантаження зі створенням максимальних зусиль в балці несиметричним навантаженням відносно осі проїзної частини.

Для розташування ПАЕ на об'єкті контролю застосовували лінійну схему локації джерел АЕ. ПАЕ розміщували на внутрішній стороні балки Б-1, на верхній грані полицки у прогоні 0-1, крок між ними визначали за методикою, яка описана в [33]. Таким чином, урахувавши згасання пружних хвиль АЕ та для досягнення найкращої чутливості, крок між ПАЕ становив 1,0 м.

Таку схему розташування ПАЕ вибрали з метою оцінки роботи балки в найрозтягнутіших її зонах. В місцях встановлення ПАЕ на метал наносили шар акустопрозорого мастила з метою забезпечення найкращого акустичного контакту.

Для АЕ-дослідження балки Б-1 використали квазірезонансні ПАЕ з робочою смугою частот 0,2...0,6 МГц. Коефіцієнт підсилення попереднього підсилювача становив 28 дБ, а АЕ-тракту — приблизно 45 дБ. САЕ реєстрували в смузі час-

тот 200...600 кГц, яку формували фільтрами високих та низьких частот.

Як показали випробування, генерування поодиноких сигналів АЕ з низькими амплітудами в основному відбувалося під час статичного навантаження моста першим, другим та третім автомобілями (загальна вага автомобілів 66,3 т). Вони генерувалися дискретно практично рівномірно в середній частині балки між ПАЕ №№ 4...8. Їх амплітуди знаходилися нижче рівня, який попередньо визначили в лабораторних умовах під час встановлення критерію початку старту МТ в бетоні мостових конструкцій [34], а саме  $\leq 4,0$  у.о. (методика описана вище). Це свідчить про те, що в контрольованій балці Б-1, яка була найнавантаженою в умовах статичної схеми випробувань, немає розвитку критичних тріщиноподібних дефектів, а амплітудний рівень САЕ та їх спектральні характеристики відповідають локальному мікроруйнуванню компонент структури залізобетону. Утворення таких мікротріщин за даного значення навантаження (0...90,3 т) та прогинів по середині балки Б-1 (максимальний прогин становив 0,35 мм) не впливає на міцність і тріщиностійкість балки. На рис. 12 показана схема розташування ПАЕ на балці, а на рис. 13 — харак-

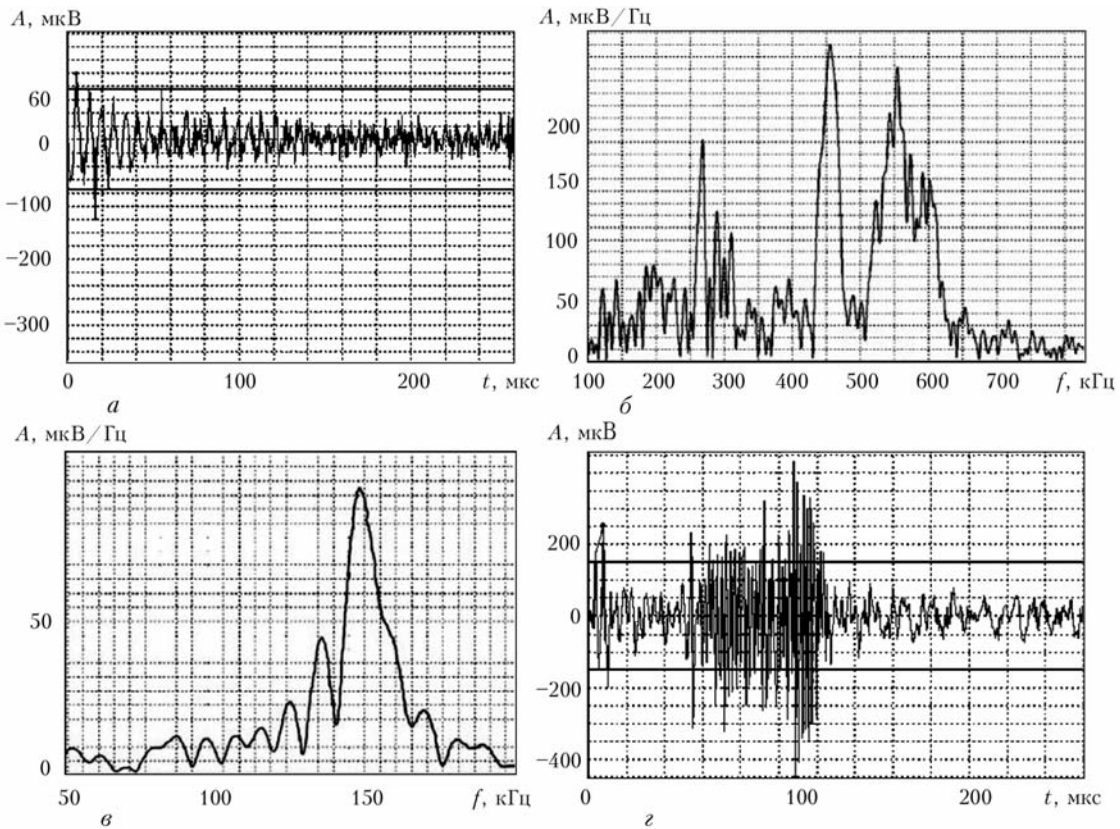


Рис. 13. Хвильові відображення (а, в) та спектральні характеристики (б, г) характерного сигналу АЕ під час завантаження прогону 0 — 1 одним (а, б) та двома (в, г) автомобілями (ПАЕ 5)

терні САЕ, які реєстрували під час навантаження балки прогонової будови одним, двома та трьома автомобілями, відповідно.

В результаті проведених випробувань та з урахуванням вище викладених методологічних підходів зроблено такий висновок. САЕ, які генерувалися під час статичного випробування мосту, не перевищують допустимий рівень амплітуд сигналів АЕ, які є критичними для залізобетону балки, і не є характерними для старту та ранніх стадій розвитку руйнування у залізобетоні.

**Методичні рекомендації щодо АЕ-діагностування елементів мостових конструкцій.** На підставі проведених досліджень методика АЕ-діагностування великогабаритних бетонних конструкцій має передбачати урахування кількісних показників параметрів сигналів АЕ, що супровод-

жують різні механізми зародження та розвитку руйнування матеріалу. Деякі з них встановлюються лабораторно, інші — під час проведення випробувань.

В лабораторних умовах випробувань перед початком АЕ-діагностування необхідно визначити амплітудно-частотні характеристики САЕ, що супроводжують:

1. Відшарування щебеневого включення від цементної матриці (для наведених вище випробувань за напружень  $\sigma_1 = 0,9...1,1$  МПа генерувалися САЕ з амплітудами  $A_{max} = 9,5...12,7$  у.о.).

2. Руйнування цементного каменю (для наших експериментів за напружень  $\sigma_2 = 2,5...3$  МПа,  $A_{max} = 10,0...37,0$  у.о.).

3. Стадії руйнування бетону (наприклад, для бетону В-35 та описаних вище режимів відбору та обробки САЕ отримали амплітуди АЕ, приведені у табл. 4 за навантаження-стиску,  $R$  — критичні значення напружень руйнування бетону).

4. Відшарування арматури від бетону (в нашому випадку зумовлюється напруженнями  $\sigma_3 = 220$  МПа, а сигнали АЕ мають амплітуди  $A_{max} = 10,0$  у.о.).

Безпосередньо на об'єкті контролю:

1. Визначити коефіцієнт зникання  $d$  пружних хвиль АЕ. У наведених вище випробуваннях він становить: для цементно-піщаної суміші  $4,28...5,29 \text{ м}^{-1}$ ; бетону В-35  $1,98...2,44 \text{ м}^{-1}$ ; залізо-

Таблиця 4. Характерні амплітуди сигналів АЕ на різних стадіях руйнування бетону

Стадія руйнування	Амплітуда $A_{max}$ , у.о		
	цементно-піщана суміш	бетон на щебеневої основі	бетон на гравійній основі
I ( $\sigma < 0,2R$ )	2,0	3,5	8,5
II ( $0,2R \leq \sigma < 0,75R$ )	2,5	4,5	22,0
III ( $0,75R \leq \sigma < 0,96R$ )	4,0	6,5	22,5
IV ( $\sigma \geq 0,96R$ )	20,5	21,0	>25,0

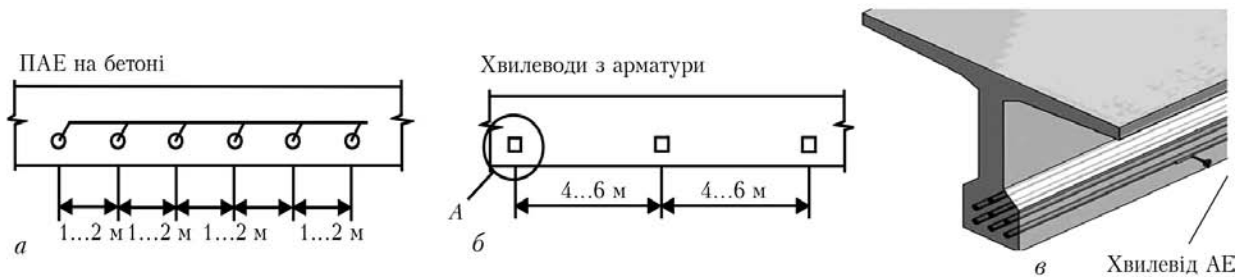


Рис. 14. Схеми розташування первинних перетворювачів АЕ (а, б) на об'єкті контролю та один зі способів виготовлення хвилеводів АЕ (в)

бетону (бетону В-35)  $3,29...4,47 \text{ м}^{-1}$ ; пошкодженого залізобетона (бетону В-35 з наявними МТ)  $5,55...6,32 \text{ м}^{-1}$ ; залізобетонної труби (розміри:  $d = 1 \text{ м}$ ,  $l = 5 \text{ м}$ ,  $t = 0,1 \text{ м}$ ; бетону В-20)  $5,04...7,59 \text{ м}^{-1}$ .

2. Вибрати оптимальну відстань між первинними перетворювачами АЕ (як показали експерименти, для бетону В-35 вона становить  $L_{\min} = 1,36 \text{ м}$ ,  $L_{\max} = 2,0 \text{ м}$ ) та, в залежності від мети випробувань, схему розташування хвилеводів АЕ та ПАЕ на об'єкті контролю (рис. 14).

3. Після установки ПАЕ на об'єкті контролю провести тарування чутливості вимірювальних каналів і оптимізувати режими вимірювань. Оптимізування установки ПАЕ провести згідно методики, описаної у праці [33, 35].

4. Провести випробування. За появи сигналів АЕ під час навантаження встановити стадії розвитку МТ у залізобетоні, виходячи із наведених методологічних засад (у наших випробуваннях процес початку макроруйнування можна охарактеризувати параметрами —  $K_{IC} = 0,364 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{-1/2}$ , МТ — півеліпс з осями:  $a = 1 \text{ мм}$ ,  $b = 2 \text{ мм}$ ;  $K_{IC} = 0,378 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{-1/2}$ , МТ — півдиск:  $r = 1,5 \text{ мм}$ ).

5. Після проведення випробувань скласти протокол АЕ-діагностування, де вказати режими вимірювань та випробувань, привести отримані результати тощо.

Таким чином, в результаті проведених досліджень встановлено, що АЕ-діагностування елементів мостових конструкцій повинно здійснюватись на підставі детальної оцінки фізичних особливостей їх матеріалу, які визначають як під час лабораторних досліджень, так і під час попередніх підготовчих робіт на об'єкті контролю. Для отримання достовірної інформації необхідно використовувати найстійкіші параметри АЕ, встановлені методами спектрального аналізу сигналів.

*Изложены теоретико-экспериментальные исследования, проведенные с целью создания методологических рекомендаций по акустико-эмиссионному диагностированию элементов мостовых конструкций из бетона и железобетона. Объекты исследований — упругие волны, которые возникают во время зарождения и ранних*

*стадий развития разрушения этих материалов. Экспериментально подтверждено, что главным условием разрушения является достижение критических значений нагрузок и деформаций в локальных зонах материала, которые являются причиной разрушения отдельных компонент структуры бетона и железобетона. Показано, что ранние стадии разрушения сопровождаются возникновением и последующим развитием микротрещин, которые под действием нагружения переходят в макротрещины. Во время распространения упругих волн АЭ в бетоне и железобетоне происходит существенное изменение их параметров в результате рассеяния, дифракции и рефракции в структуре материала. Получены количественные показатели коэффициентов затухания, что имеет важное значение для построения практических методик АЭ-диагностирования крупногабаритных элементов конструкций.*

*В итоге создан алгоритм использования методики оптимизации установления первичных пьезопреобразователей акустической эмиссии на объекте контроля и предложены практические рекомендации для проведения акустико-эмиссионного диагностирования крупногабаритных элементов строительных конструкций. Таким образом, полученные в работе результаты нацелены на решение важнейшей научно-технической задачи — создания методологических основ акустико-эмиссионного диагностирования конструкций длительной эксплуатации, которыми являются мостовые сооружения.*

1. *Експлуатація і реконструкція мостів / Н. С. Страхова, В. О. Голубев, П. М. Ковальов та ін. / Під заг. ред. А. І. Лянтуха-Лященко. — Київ: Транспортна академія України, 2000. — 384 с.*
2. *Евграфов Г. К., Богданов Н. Н. Проектирование мостов. — М.: Транспорт, 1966. — 664 с.*
3. *Типовые проекты сооружений на автомобильных дорогах. — Вып. 122-62. Пролетные строения железобетонные сборные с натяжением прямолинейной арматуры до бетонирования, пролетами в свету: 10,0; 12,5; 15,0 и 20 м под нагрузки Н-18 и НК-80. — Союздорпроект: Киев. филиал, 1963. — 154 с. Введ. в действие с 12 апреля 1963 г.*
4. *Типовые проекты сооружений на автомобильных дорогах. Вып. 122-63. Пролетные строения железобетонные сборные с натяжением прямолинейной арматуры до бе-*





- тонирования, пролетами в свету: 10,0; 12,5; 15,0 и 20 м под нагрузки Н-18 и НК-80. — Союздорпроект: Киевский филиал, 1963. — 154 с. Введ. в действие с 12 апреля 1963 г.
5. *Сборник* типовых проектов струнобетонных пролетных строений. ВТП-15. Пролетные строения из двутавровых балок пролетами 20,0 м под нагрузки Н-30 и НК-80. — Киев: Укргипродортранс, 1963. — 25 листов. Введ. в действие с 2 марта 1964 г.
  6. *Сборник* типовых проектов струнобетонных пролетных строений. ВТП-16. Часть II. Пролетные строения из двутавровых балок пролетами 10,0 и 15,0 м под нагрузки Н-30 и НК-80. — Киев: Укргипродортранс, 1963. — Листы 33-74. Введ. в действие с 2 марта 1964 г.
  7. *Коваль П. М.* Проблема забезпечення довговічності залізобетонних балкових автодорожніх мостів // Автошляховик України. — 2004. — № 1. — С. 29-35.
  8. *Экспериментальные* методы исследования деформаций и напряжений. Справочное пособие / Б. С. Касаткин, А. Б. Кудрин, Л. М. Лобанов и др. — Киев: Наук. думка, 1981. — 584 с.
  9. *Российский В. А., Назаренко Б. П., Словинский Н. А.* Примеры проектирования сборных железобетонных мостов. — М.: Научно-техническое изд-во Министерства автомобильного транспорта и шоссейных дорог РСФСР, 1962. — 496 с.
  10. *ГОСТ 24452-80.* Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона. — Введ. в действие 01.01.1982. — М.: Изд-во стандартов, 1981. — 20 с.
  11. *Чайка Б. С.* Розрахунки будівель та їх конструкцій. Ч.І. — Львів: Вид-во «Край», 1995. — 455 с.
  12. *Скальський В. Р., Лотоцький Ю. Л.* Оцінка амплітуд сигналів акустичної емісії під час руйнування бетонних кубів // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. — Львів, 2004. — Вип. 9. — С. 54-61.
  13. *Акустико-емісійна* оцінка ранніх стадій мікротріщиноутворення в композитному матеріалі / В. Р. Скальський, О. М. Сергієнко, П. М. Коваль, Ю. Л. Лотоцький // Машинознавство. — 2004. — № 5. — С. 36-40.
  14. *Розподіл* напружень у призмі з еліпсоїдальним включенням за триточкового її згину / В. Р. Скальський, О. М. Сергієнко, Ю. Л. Лотоцький, П. М. Коваль // Дороги і мости. — 2005. — № 3. — С. 16-25.
  15. *Скальський В. Р., Лотоцький Ю. Л.* Оцінка об'ємної пошкодженості бетону на різних стадіях розвитку руйнування // Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва. — 2005. — № 545. — С. 155-161.
  16. *Оцінка* розподілу напружень за триточкового згину ізотопної призми з еліпсоїдальним включенням / В. Р. Скальський, О. М. Сергієнко, Ю. Л. Лотоцький, Р. М. Плахтій // Вісник ЛНУ ім. І. Франка. — Сер. мех.-мат. — 2006. — Вип. 65. — С. 173-179.
  17. *Оценка* параметров сигналов акустической эмиссии при отслоении арматуры в железобетоне / В. Р. Скальський, Л. Ю. Лотоцький, Р. М. Плахтій, Р. И. Сулым / Тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. «Современные проблемы и перспективы механики», Ташкент, 17-18 мая 2006 г. — Ташкент, 2006. — С. 386-388.
  18. *Оценка* сигналов акустической эмиссии, генерируемых разрушением железобетонных балок / В. Р. Скальський, П. М. Коваль, П. М. Шашук, Ю. Л. Лотоцький // Технич. диагностика и неразруш. контроль. — 2005. — № 3. — С. 27-30.
  19. *Arrington M., Evans B. M.* Acoustic emission testing of high alumina cement concrete // NDT Int. — 1977. — № 7. — P. 81-87.
  20. *Tomachevsky E. G., Drouet A., Despreslas P. J.* Recherche de la diminution de resistance en fraction du beton par detection d'emission d'ondes de contrainte // J. d'Etudes sur l'Emission Acoustique. — 1975. — 17. — P. 336-360.
  21. *Механика* разрушения и прочность материалов: Справ. пособие / Под общ. ред. В. В. Панасюка. — Т.1. Основы механики разрушения материалов // В. В. Панасюк, А. Е. Андрейкив, В. З. Партон. — Киев: Наук. думка, 1988. — 488 с.
  22. *Разрушение* бетона и его долговечность / Е. А. Гузеев, С. Н. Леонович, А. Ф. Милованов и др. / Под ред. Е. А. Гузеева. — Минск: Редакция журнала «Тыдзень», 1997. — 170 с.
  23. *СН-200-62.* Технические условия проектирования железобетонных, автодорожных и городских мостов и труб. — М.: Полиграф объединение МПС, 1962. — 328 с.
  24. *Правила* и указания по проектированию железобетонных, металлических, бетонных и каменных искусственных сооружений на автомобильных дорогах. — М.: Дориздат, 1948. — 200 с.
  25. *ГОСТ 29167-91.* Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. — Введ. в действие 01.07.1992 г. — М.: Изд-во стандартов, 1992. — 20 с.
  26. *Grosse C. U.* Quantitative zerstörungsfreie Pruefung von Baustoffen mittels Schallemissionsanalyse und Ultraschall / Dissertation Universitat Stuttgart. — Stuttgart, 1996. — 168 s.
  27. *Koppel S.* Schallemissionsanalyse zur Untersuchung von Stahlbetontragwerken / Abhandlung zur Erlangung des Titels Doktor der technischen Wissenschaften. — Der Eidgenoessischen technischen Hochschule Zuerich, 2002. — 184 s.
  28. *Ohtsu M.* Acoustic emission characteristics in concrete and diagnostic applications // J. of Acoust. Emis. — 1987. — 6, № 2. — P. 99-108.
  29. *Berthelot J. M., Ben Souda M., Robert J. L.* Study of wave attenuation in concrete // J. Mater. Res. — 1993. — 8, № 9. — P. 2344-2353.
  30. *ГОСТ 6482-88.* Трубы железобетонные безнапорные. Введ. в действие 01.01.1990 г. — М.: Изд-во стандартов, 1989. — 54 с.
  31. *Типовой* проект 503-7-015.90. Трубы водопропускные круглые железобетонные из длиномерных звеньев отверстием 1,0, 1,2, 1,4, 1,6 м под автомобильные дороги. Введ. в действие 01.01.1990 г. — Воронеж: Воронежский филиал ГипродорНИИ, 1989.
  32. *The EWAGE AE Code* for acoustic emission examination of sources of discrete acoustic events // NDT Int. — 1981. — 14, № 8. — P. 181-183.
  33. *Скальський В. Р., Сергієнко О. М., Лотоцький Ю. Л.* Алгоритм оптимізації розташування первинних п'єзоперетворювачів акустичної емісії // Дороги і мости. — 2007. — № 7. — С. 184-189.
  34. *Скальський В. Р., Лотоцький Ю. Л.* Оцінка амплітуд сигналів акустичної емісії під час руйнування бетонних кубів // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. — 2004. — Вип. 9. — С. 54-61.
  35. *Назарчук З. Т., Скальський В. Р.* Діагностика пошкодженості матеріалів і елементів конструкцій методом акустичної емісії // Актуальные проблемы современного материаловедения. В 2-х т. — Т.2. — Киев: ИД «Академперіодика», 2008. — С. 497-527.



## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МОРСКИХ СУДОВ

В. А. ТРОИЦКИЙ

*Своевременное обнаружение в металлоконструкциях морских кораблей опасных усталостных трещин и серьезных коррозионных поражений позволяет предотвратить катастрофы на море, большие финансовые и экологические потери. Решению этой проблемы посвящен один из проектов ЕС, в выполнении которого принимает участие Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины и Украинское общество НКТД.*

*Timely detection of hazardous fatigue cracks and serious corrosion damage in sea ship metal structures enables prevention of sea accidents, great financial losses and ecological disasters. One of EU projects with the participation of the E.O.Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine and Ukrainian Society for NDTT, is aimed at solution of this problem.*

Выполнение в последние десятилетия международных инновационных проектов привело к появлению большого количества специализированных судов различных типов (танкеров, сухогрузов, строительных платформ и т. п.) и соответственно возросло количество морских аварий. Морские катастрофы, связанные с разрушением нефтяных танкеров, потребовали разработки нового европейского проекта (7-я Рамочная Программа ЕС) «Ship-Inspector» (полное название проекта: «Определение критически опасных трещин и коррозий кораблей с применением новых сенсоров»).

Данная тема является развитием предыдущего проекта, который был в 6-й Рамочной Программе ЕС по низкочастотному УЗК, имевшего название LRUT. В новом проекте на период 2009–2012 гг. кроме идей по низкочастотному УЗК предполагается использовать технические средства для определения зон усталости и предразрушений, различные новые сенсоры, в том числе фазированные решетки. При этом количество исполнителей существенно сокращено, а возможных НК-технологий — расширено.

Структурные, усталостные разрушения — главная причина повреждений кораблей, загрязнения морей, прибрежных вод. Так, в 2004 г. общее количество транспортируемых по морю нефтепродуктов достигло 2 млрд т/год (чем было занято более 40 % всего морского транспорта). ЕС насчитывает 27 % мирового морского транспорта. Почти 90 % европейской нефти перевозят по морю. Во всем мире потребляется свыше 2,5 млрд т нефти, при этом приблизительно 3 млн т каждый год исчезают в результате разрушений танкеров. Крушения нефтяных танкеров составляют 12 % всех морских аварий. В результате крушения кораблей каждый год умирает около 1000 чел.

В Европе много верфей по производству судов различного назначения, поскольку морская про-

мышленность является рентабельным источником европейской экономики, где занято около 2 млн людей, которые работают как в кораблестроении, так и эксплуатации кораблей. На Европу приходится 38,5 % мирового флота, который обеспечивает 90 % оборота внешней торговли и 40 % внутренней торговли этой части света.

Назорные органы должны способствовать тому, чтобы владельцы кораблей применяли новые технологии НК своих судов. Поэтому в выполнении проекта Ship-Inspector принимают участие три крупные международные надзорные организации по сертификации: American Beren of Shipping, Lloyds Register, Class NK.

Целью проекта является развитие новых технологий НК и систем для обнаружения дефектов и коррозий в критических зонах конструкций кораблей без перемещения их в сухой док. Проект «Ship-Inspector» поможет операторам, обществам и агентствам по диагностированию более эффективно предупреждать этот риск. Исполнители проекта «Ship-Inspector» будут разрабатывать, пропагандировать технологии и связанное с ними обучение персонала малых и средних предприятий (МСП), представленных обществами по НК, одним из которых является Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики. В мире около 12000 МСП, которые проводят мониторинг состояния морских сооружений и кораблей. Новые виды технологий, которые будут разработаны в процессе выполнения проекта «Ship-Inspector», сократят риск, которому подвергаются сейчас инспекторы, работающие на кораблях. Выполнение этого проекта поможет сократить травматизм среди рабочих, занятых ремонтом и контролем морских судов.

Участниками проекта являются: TWI (Англия), DGZfP (Германия), USNDT (Украина), BNDTS (Болгария), AIPND (Италия), SMART Group (Ан-

глия), I&T Nardoni (Италия), HSNT (Греция), Isotest (Италия), Tecnitest (Испания), Zenon (Греция), Cereteth (Греция), HSE (Англия), American Bureau of Shipping — Europe (Англия), Lloyds Register EMEA (Англия), Class NK (Англия). Таким образом, выполнением этого проекта заняты 16 организаций из 10 стран Европы.

Консорциум «Ship-Inspector» будет разрабатывать новые технологии и внедрять связанные с ними системы обучения среди МСП, представленных обществами по НК — участниками проекта. Известно, что в последние годы благодаря развитию цифровых методов обработки информации и достижениям в материаловедении появилось много принципиально новых возможностей в области дефектоскопии.

На основе последних достижений целями данного проекта являются разработки:

- правильного набора комплексных решений по НК и мониторингу;
- новых технологий УЗ испытаний;
- принципов построения мощных дефектоскопов для диагностики без сканирования больших площадей;
- систем управления сенсорами и распознавания информации;
- новых технологий для осуществления сухого контакта сенсора и объекта, основанных на макроволоконных композитах;
- методов применения продолжительного мониторинга состояний;
- сенсорных решеток, которые смогут расширить распознаваемость несплошностей, а также издание пособий по оборудованию и технологиям НК по применению и обучению операторов.

В этом перечне предлагаемых намерений под понятием «сенсор» имеются в виду акустические, электромагнитные и другие преобразователи.

Объективные данные для постановки данного проекта возникли в 2006 г., когда было выяснено, что каждый год свыше 400 кораблей тонут и многие из них — вследствие ослабления конструкций из-за коррозии, плохого качества сварки и плохого мониторинга их состояния. В данное время 89000 судов курсируют океанами и многие из них идут транзитом европейскими водами. Существует статистическая вероятность, что приблизительно один корабль из восьми затонет до истечения срока службы (30 лет) в связи с тем, что не было проведено надлежащего обслуживания и соответствующего мониторинга. Причем, это касается не только собственно металлоконструкций, но и силового оборудования на корабле.

Контроль корпуса корабля, в основном, проводится без перемещения его в сухой док. Часто корабли изготавливаются из секций, которые позже сваривают. Обычно большое судно или гражданский лайнер имеет порядка 120 опасных швов,

требующих детального регулярного циклического контроля, что определено такими Морскими регистрами, как Ллойд, ABS и NK. Все три надзорные организации являются участниками проекта «Ship-Inspector». По их мнению, большой корабль имеет порядка 600000 м<sup>2</sup> листовой стали разной толщины, которую периодически необходимо детально контролировать на наличие коррозии. Часто судно нужно доставить в сухой док для контроля швов обычно в средней части корпуса, где возможны трещины вследствие сильных динамических нагрузок. В этой же части корпуса располагаются и опасные зоны стресс-коррозионных поражений.

Существующие методы контроля таких швов на трещины и большие зоны коррозии имеют следующие недостатки:

- перед контролем необходимо разгрузить корабль и переместить его в сухие доки; нужна длительная просушка в течение двух недель. Каждый день простоя большого нефтяного танкера в доке стоит приблизительно до 50000 евро;
- тщательная очистка всей поверхности металла;
- сейчас проводится в основном визуальный контроль без записи результатов на жесткий носитель и соответствующей обработки информации;
- операторы вынуждены работать в плохих условиях;
- внутри отсеков могут быть токсические газы;
- работа в подвешенном на люльке положении или лесах (при контроле больших кораблей оператор взбирается на высоту до 100 м).

Задачей проекта является максимальное уменьшение роли описанных выше позиций риска для операторов НК.

На кораблестроительных заводах уровни опасности для персонала меньше. Особо высокая опасность для операторов в доках. Поэтому методики НК на судостроительных верфях также необходимо совершенствовать.

Контроль, проводимый на верфи и в доке, должен соответствовать правилам надзорных агентств. Особо ненадежен контроль, который выполняют водолазы. Они ищут обычно только коррозию днища или двойного дна топливных резервуаров. Пока при подводной дефектоскопии исследований на обнаружение усталостных и стресс-коррозионных трещин не проводят.

Большинство танкеров сегодня имеют двойной корпус и двойное дно. Это делает часть конструкций недоступной даже для водолазов с применением существующих методов ручного контроля. Конструкция кораблей с двойным дном приводит к развитию коррозии особого типа на внутренних поверхностях и дне.

Обычно каждую секцию корпуса корабля сва-



ривают в цеху, затем секции перемещают на сборку посредством одномодульной сварки. Здесь обычно выполняется выборочный НК только 10 % длины швов. Применяемый ручной контроль проводится очень медленно и ограничен в получаемой информации.

Предполагаемые технические решения включают разработки, выполненные в значительной степени по предыдущему проекту LRUT, посвященному применению управляемых УЗ волн в диапазоне 10 м и более (дальнодействующий УЗ контроль). До сих пор эта технология применялась преимущественно на трубах различного назначения. Дальнейшие исследования инновационного характера будут способствовать развитию этих технологий и с их помощью появится возможность решать трудные задачи диагностики крупных инженерных сооружений, таких как корпуса кораблей. Надо разработать новые технологии для больших плоскостей, в том числе используя УЗ линейные фазированные решетки (ЛФР). Решить эту проблему важно не только для кораблей, но и днищ нефтяных резервуаров.

Преимущество предлагаемой для внедрения технологии УЗ-линейной решетки заключается в том, что она распространяет низкочастотные колебания на всю область контроля и конструкции с одной точки. Эту технологию можно применять для осмотра недоступных частей конструкции. Это будет первая в мире технология контроля двойного корпуса кораблей без их установки в сухой док. Расположение потенциально дефектных областей будет точно рассчитываться, исходя из расстояния от УЗ преобразователей.

В настоящее время в мировой практике НК протяженных объектов применяют упрощенные решетки с пьезоэлектрическими или ЭМА-сенсорами. Ультразвук вдоль объекта передается на десятки метров и дефекты (преимущественно коррозионные) отражают его обратно на решетку. По времени пробега ультразвука определяют местонахождение дефекта в трубе. При наличии отраженного сигнала от дефекта это место детально обследуется другими стандартными технологиями контроля. Технология дальнодействующего УЗ контроля применяется для нефте- и газопроводов, пищевых трубопроводов, канатов, стояков, рельсовых путей, труб теплообменников, свай и столбов. До сих пор не было проведено ни одного исследования по осмотру таким образом плоских элементов корпуса кораблей. В данном проекте консорциум предлагает разработать инновационный метод технологии ЛФР для дальнодействующего контроля. Метод ЛФР также применим для контроля криволинейной поверхности корпуса корабля.

Новые технологии позволят контролировать корпус корабля как выше, так и ниже ватерлинии;

значительно увеличится диапазон разрешимых ситуаций, когда ультразвук существенно ослабляется слоем морских наслоений. Будут найдены решения распознавания между глубокими/узкими и широкими/мелкими дефектами, что пока не выполняется.

Специфическими целями проекта являются:

- изыскание принципов построения сенсоров и дефектоскопов, программного обеспечения, способных расширить диапазон диагностируемых плоскостных зон так, чтобы можно было контролировать с одной позиции зону до 400 м<sup>2</sup>;

- сейчас в дальнодействующем низкочастотном УЗ контроле труб используются три типа волн: сдвиговые горизонтальные, продольные и торсионные. Для контроля корпуса корабля видимо будут применяться только два типа волн: изгибные и продольные. Надлежащий выбор типов волн будет выполнен прежде всего по коэффициенту сигнал/шум отраженных сигналов;

- способность определять тип дефекта. Диапазон этих возможностей будет значительно увеличен за счет усовершенствования обработки сигнала;

- из-за сложной конфигурации корпуса больших размеров проблематичен контакт между преобразователями и поверхностью листа. Технология обработки сигналов, таких как вейвлет (малые волны), соответствующая фильтрация и расщепление спектра будут применены для восстановления слабых сигналов и улучшения коэффициента сигнал/шум;

- развитие методов фокусировки для распознавания мелких дефектов и глубоких узких дефектов;

- особым объектом являются двойные корпуса судов, которые будут контролироваться сенсорами, установленными постоянно. Такие системы мониторинга уже эксплуатируются для наблюдения за трубопроводами в энергетике.

Проблематичным является прикрепление сенсора. Когда пьезоэлектрические сенсоры, применяемые для проведения дальнодействующего УЗ контроля, прикрепляются всухую к поверхности, каждый элемент сенсора прижимают к трубе с нагрузкой 20 кг. Поскольку применяется большое количество элементов, такая нагрузка станет серьезным ограничением для применения этой технологии. Пока неясно, какое должно быть сопротивление прижиму, однако нужная нагрузка пока еще не исследована.

Должны быть найдены альтернативные приспособления для обеспечения контакта (присасывающиеся подушечки, магниты). В связи с этой проблемой пьезотехнологии возрастает роль ЭМА-техники [1].

Будут разработаны ЭМА-сенсоры с приспособлениями для контакта: ЭМА-технологии и реше-

ния на основе явлений магнитострикции должны быть также подробно изучены.

Оптимальное решение этих подходов позволит применять низкочастотную технологию в новых ситуациях, в частности, на конструкциях с плоской поверхностью.

Приобретенные новые знания должны обеспечить обучение, распространение и эксплуатацию усовершенствованной системы дальнедействующего УЗ контроля. В этом рабочем пакете результаты, полученные в ходе проекта, будут передаваться организациям, которые ответственны за обеспечение услуг по контролю кораблей; будут организованы местные семинары и конференции для внедрения разработок в промышленность, что собирается выполнять и УО НКТД. Отдел неразрушающих методов контроля качества сварных соединений Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины внедряет ЭМА-дефектоскопы и ЭМА-толщинометры для контроля сварных соединений и толщинометрии металлоконструкций без тщательной зачистки их поверхностей, для нахождения зон стресс-коррозионного растрескивания. В ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины достигнуты определенные успехи [2, 5] по исследованию возможностей низкочастотного УЗК, которые будут использованы при выполнении проекта «Ship-Inspector».

Будут подготовлены руководства разных уров-

ней, чтобы обеспечить распространение новых технологий, их лучшее практическое применение [1, 6].

Общее руководство проектом «Ship-Inspector» будет выполняться Кембриджским институтом TWI (Англия). Он будет планировать, организовывать деятельность всего консорциума, собирать от исполнителей отчеты и пр. Реализация проекта «Ship-Inspector» будет способствовать развитию технологий НК ответственных металлоконструкций судостроения, сокращению катастроф на море.

1. *Неразрушающий контроль и диагностика* / В. В. Клюев, Ф. Р. Соснин, В. Н. Филимонов и др. — М.: Машиностроение, 1995. — 488 с.
2. *Троцкий В. А.* Краткое пособие по контролю качества сварных соединений. — Киев: Феникс, 2006. — 320 с.
3. *Патон Б. Е., Троцкий В. А., Бондаренко А. И.* Метод низкочастотного УЗК протяженных объектов направленными волнами // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2008. — № 2. — С. 20–31.
4. *Распространение нормальных волн в трубах, дисперсионные характеристики нормальных волн* / В. А. Троцкий, Г. Л. Комиссарова, В. П. Радько, Е. А. Давыдов // Там же. — 2008. — № 3. — С. 14–24.
5. *Троцкий В. А.* Альтернативные решения традиционным методам в неразрушающем контроле сварных соединений // Сб. докл. Шестой нац. конф. UkrNDT-2009. — Киев, 2009. — С. 22–32.
6. *Троцкий В. А.* Визуальный и измерительный контроль деталей машин, металлоконструкций, сварных соединений. — Киев, Феникс, 2009. — 275 с.

*Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины,  
Киев*

*Поступила в редакцию  
14.09.2009*

### **Кайдалов А. А. Современные технологии очистки поверхностей конструкционных материалов.** — Киев: Изд-ние ун-та «Украина», 2009. — 540 с.

Изложены современные данные об основах физики и технологий очистки поверхностей конструкционных материалов с применением различных методов химической, механической и термической очистки. Описаны технические требования, принципы построения и характеристики современного отечественного и зарубежного оборудования для всех методов очистки. Даны сведения по охране труда и окружающей среды при наиболее распространенных методах очистки. Освещен опыт промышленного применения всех технологий очистки.

Рассмотрены требования к очистке поверхности материалов перед выполнением сварки и родственных процессов обработки, а также технологии очистки поверхностей основных конструкционных металлов и сварочной проволоки. Приведены сведения по стандартам в области очистки поверхностей конструкционных материалов.

Для научных и инженерно-технических работников, занятых в машиностроении, металлургии и других отраслях, связанных с изготовлением изделий, требующих очистки в процессе их производства и эксплуатации. Может быть полезна преподавателям и студентам вузов.





## ПРИЙМАЛЬНО-ДЕТЕКТУЮЧИЙ ТРАКТ ЦИФРОВОЇ РАДІОГРАФІЧНОЇ СИСТЕМИ З ПІДВИЩЕНИМ ПРОСТОРОВИМ РОЗДІЛЕННЯМ

В. Д. РИЖИКОВ, О. Д. ОПОЛОНІН, О. К. ЛИСЕЦЬКА, С. Н. ГАЛКІН, Е. Ф. ВОРОНКІН, В. Л. ПЕРЕВЕРТАЙЛО

*Висвітлюється пошук резервів для поліпшення виявної та роздільної здатності цифрових радіографічних систем на базі детекторів «сцинтилятор-фотодіод». Визначено напрямок створення приймально-детектующого тракту з підвищеним просторовим розділенням за рахунок удосконалення структурної схеми, виготовлення 32-канальних сцинтиляційних збірок та фотоприймальних пристроїв з інтегрованою електронікою. За результатами випробувань зроблено висновки щодо застосування пристрою для контролю зварних з'єднань та металоконструкцій.*

*Search for potential for improvement of the detection and resolution capabilities of digital radiographic systems based on Scintillator-photodiode detectors is described. The approach based on creation of the receiving-detecting channel with an improved spatial resolution due to improvement of block-diagram, manufacturing 32-channel scintillation assemblies and photodetectors with integrated electronics, is outlined. Testing results were the basis to draw conclusions on application of the device for testing of welded joints and metal structures.*

Плівковий радіографічний контроль (РГК) залишається одним з найнадійніших при експлуатації систем трубопроводів та металоконструкцій [1–10]. Його головною перевагою є роздільна здатність до 16...18 пар ліній/мм [9, 10]. Однак значний досвід показав, що не завжди забезпечуються точні оцінки ушкоджень, а проведення РГК потребує дорогих матеріалів та значних часових витрат. Підвищення вимог до якості неруйнівного контролю (НК) та технічної діагностики (ТД) визначило потребу у розвитку новітніх засобів з високою контрастною чутливістю.

Заповнити цю нішу можуть цифрові радіографічні системи (ЦРС) на базі приймально-детектующого тракту (ПДТ) типу «сцинтилятор-фотодіод» (СЦ-ФД) [11–13], перевагами яких порівняно з РГК є:

- висока ефективність реєстрації рентгенівського випромінювання (90...98 %) у широкому діапазоні енергій (30 кеВ...10 МеВ);
- отримання тіншового рентгенівського зображення у реальному масштабі часу;
- збереження отриманих даних у цифровому вигляді;
- застосування математичних методів обробки;
- відсутність витратних матеріалів (плівки з вмістом срібла, хімічних реактивів тощо).

Такі ЦРС вже надійно зарекомендували себе у інтроскопах митного контролю [12], також їх можна використовувати для інспекції стану зварних з'єднань [13]. Принциповою перешкодою для прямого застосування є той факт, що ЦРС посту-

пається РГК по роздільній здатності, однак за контрастною чутливістю по щільності перевершує: (0,8...1 %) та (1...2 %) відповідно.

Метою даної роботи є створення новітніх приладів ЦРС з покращеними характеристиками — виявною та роздільною здатностями.

**Напрямки створення ЦРС з покращеними характеристиками.** Враховуючи досвід розробки рентгенівських інтроскопів [12], виявлено, що є резерви для поліпшення експертизи об'єктів контролю (ОК) за рахунок створення ПДТ з підвищеним просторовим розділенням (ППР).

Першим напрямком є подолання недоліків структурної схеми ПДТ, тобто відсутність апаратної компенсації (калібровки) розкиду параметрів по каналах лінійки детекторів (ЛД) («темнових» струмів та рентгеночутливості). Рівні як «темнових» сигналів (без рентгенівського випромінюван-

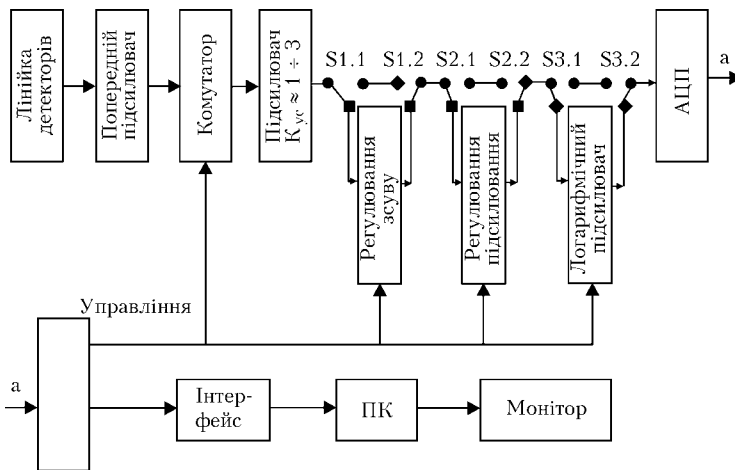


Рис. 1. Структурна схема ПДТ



Рис. 2. Зовнішній вигляд 32-канальних детекторів рентгенівського випромінювання на базі р-і-п ФД виробництва: а — ООО «БІТ» (м. Київ); б — ЦКБ «Ритм» (м. Чернівці)



W6	1,00	±0,02
W7	0,80	
W8	0,63	
W9	0,50	
W10	0,40	
W11	0,32	±0,01
W12	0,25	

Рис. 3. Тестові об'єкти: зварені сталеві пластини, набір щупів та набір залізних дротиків (див. таблицю)

ня), так і сигналів під час рентгенівського випромінювання (без ОК) суттєво відрізняються (до 30 %) по різних каналах ЛД. Таким чином, розкид параметрів призводить до зменшення динамічного діапазону ПДТ. Крім того, при застосуванні логарифмічного підсилювача значно ускладнюється калібрування ПДТ. Проблема може бути вирішена шляхом удосконалення структурної схеми ПДТ. Нами була розроблена нова структурна схема ПДТ, що входить до складу ЦРС (рис. 1).

Реалізація цієї схеми розширює функціональні можливості ЦРС, тобто надає їй здатності апаратного калібрування зміщення та коефіцієнта підсилення по кожному каналу, сприяє підвищенню якості тіньового рентгенівського зображення.

Використання сучасної елементної бази дозволяє застосовувати поканальне калібрування сигналів 512-канальної ЛД при часі опитування усіх каналів менш, ніж 10 мс. Обрані схемні рішення дозволяють змінювати напругу зміщення  $U_{зм}$  від  $U_{зм} = 0$  В до  $U_{зм} = U_{оп}$  з кроком  $U_{кр} = U_{оп}/128$ , де  $U_{оп}$  — рівень опорної напруги. Аналогічно реалізована можливість змінення (128 значень) коефіцієнта підсилення.

Таким чином, з використанням спеціального програмного забезпечення реалізована можливість подвійного (апаратного та програмного) калібрування сигналів ЛД.

Другим напрямком для підвищення роздільної здатності ЦРС є зменшення апертури окремого каналу багатоелементної ЛД типу СЦ-ФД [11–14]. Технологія виготовлення 32-канального детектора значною мірою схожа з технологією створення 16-канального [12]. Головна різниця полягає у необхідності мінімізувати міжканальний шар відбивача. Нами виготовлено 32-канальні збірки детектування з міжканальним шаром відбивача 150...200 мкм (для 16-канальної збірки 250...300 мкм). Для розробки були використані 32-канальні р-і-п ФД з кроком розташу-

вання фоточувливих елементів 0,8 мм (рис. 2) [12].

Таким чином, була досягнута достатня ефективність детектування при малому міжканальному оптичному взаємовпливі.

**Макетні випробування ЦРС.** У якості тест-об'єктів, що дозволяють визначити виявну здатність макету ЦРС та розділення по щільності (контрастну чутливість) було використано зварені сталеві пластини товщиною 6 мм; набір щупів товщиною 0,05...0,30 мм; набір залізних дротиків від 0,25 до 1 мм (рис. 3).

Тіньове рентгенівське зображення тестових об'єктів дозволило оцінити розділення по щільності — не гірше 0,9 %, та виявну здатність — залізний дротик  $\varnothing 5$  мм, що знаходиться за сталеву пластину товщиною 6 мм.

Такі результати вимірювань свідчать про можливість використання ЦРС у якості товщиноміру або для виявлення корозійних процесів, що призводять до зменшення товщини ОК менш, ніж на 1 %.

Крім тіньового рентгенівського зображення були отримані зображення, які надають змогу

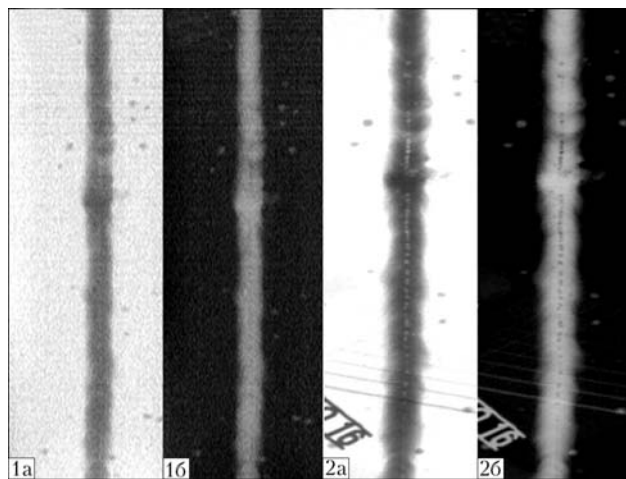


Рис. 4. Тіньове рентгенівське зображення зварного з'єднання, режим збільшення приблизно у 1,4 рази: 1а — позитив; 1б — негатив; у 8 разів: 2а — позитив; 2б — негатив

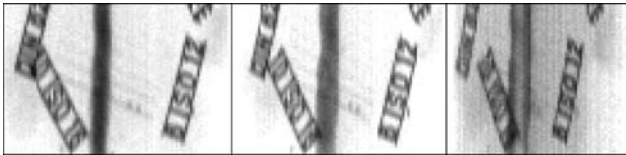


Рис. 5. Тіньові рентгенівські зображення зварного з'єднання, отримані під різними кутами зору

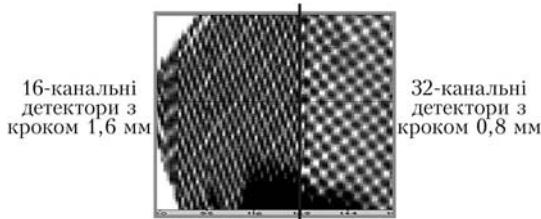


Рис. 6. Тіньове рентгенівське зображення латунної сітки (детектори: 16- та 32-канальні)

оцінити додаткові можливості використання ЦРС для контролю зварних з'єднань.

По-перше, було зроблено тіньове рентгенівське зображення зварного з'єднання, що відображено на рис. 3, у режимі збільшення приблизно у 1,4 та 8 разів (рис. 4). При збільшенні у 8 разів непровар можна бачити без додаткової математичної обробки.

Крім того, проведено послідовне сканування зварного з'єднання під різними кутами зору (рис. 5). При застосуванні послідовного відображення на екрані ПЕОМ (ракурс за ракурсом) надає оператору можливість псевдооб'ємного перегляду (на рис. 5 наведено лише три ракурси з 43, повний кут повороту дорівнює  $75,6^\circ$ ). Багаторакурсні дані дозволяють також оцінити глибину розташування дефектів при застосуванні відповідних математичних обчислень [12].

Наведені рентгенівські зображення отримані з використанням 16-канальних детекторів типу СЦ-ФД. Крок детекторів у лінійці — 1,6 мм.

32-канальний детектор рентгенівського випромінювання було змонтовано замість двох 16-канальних детекторів на платі 32-канального модуля попередніх підсилювачів, що входить до складу макету ЦРС. Це надало змогу на одному тіньовому рентгенівському зображенні наочно оцінити різницю просторового розділення при використанні 16- та 32-канального детекторів.

У якості тест-об'єкта було обрано латунну сітку з кроком 1,23 мм та діаметром дроту 0,38 мм. Отримано тіньове рентгенівське зображення при дворазовому збільшенні (рис. 6).

Порівняння тіньового рентгенівського зображення латунної сітки, отриманого за допомогою 16- та 32-канальних детекторів виявило, що використання 32-канального детектора суттєво поліпшує просторове розділення ЦРС.

## Висновки

Покращення характеристик ЦРС — виявної та роздільної здатностей — можливо за рахунок створення ПДТ з ППР.

Доцільне сполучення напрямків удосконалення структурної схеми та зменшення апертури окремого каналу багатоеlementної ЛД дозволило домогтися ППР ПДТ.

Більш ефективне використання динамічного діапазону АЦП за рахунок апаратної компенсації розширило функціональні можливості ЦРС і сприяло підвищенню якості тіньового рентгенівського зображення.

Завдяки виготовленню 32-канальних скінтіляційних збірок досягнуто високу роздільну здатність ЦРС по щільності (краще 0,9 %) та виявну здатність — залізний дріт  $\varnothing 5$  мм, що знаходиться за сталеву пластину товщиною 6 мм.

Багаторакурсне сканування надає оператору додаткову інформацію про дефекти зварного з'єднання та місце їх розташування.

Апробовано застосування ЦРС для контролю зварних з'єднань та металоконструкцій.

*Освещается поиск резервов для улучшения обнаружительной способности и пространственного разрешения цифровых радиографических систем на базе детекторов «сцинтиллятор-фотодиод». Определено направление создания приемно-детектирующего тракта с повышенным пространственным разрешением за счет усовершенствования структурной схемы, изготовления 32-канальных сцинтилляционных сборок и фотоприемных устройств с интегрированной электроникой. По результатам испытаний сделаны выводы относительно применения прибора для контроля сварных соединений и металлоконструкций.*

1. *Неразрушающий контроль* / Справ. под ред. Ключева В. В. — М.: Машиностроение, 2001. — 616 с.
2. *Методы дефектоскопии сварных соединений* / Справ. под ред. Шербинского В. Г. — М.: Машиностроение, 1987. — 515 с.
3. *Румянцев С. В., Штань А. С., Гольцев В. А.* Справочник по радиационным методам неразрушающего контроля. — М.: Энергоиздат, 1982. — 416 с.
4. *Неразрушающий контроль качества сварных конструкций* / В. А. Троицкий, В. П. Радько, В. Г. Демидко, В. Т. Бобров. — Киев: Техника, 1986. — 159 с.
5. *Неразрушающий контроль и диагностика трубопроводов* / Сб. статей под ред. Чабуркина В. Ф., 1988. — 230 с.
6. *Рентгенотехника* / Справ. под ред. Ключева В. В. — М.: Машиностроение, 1992. — 480 с.
7. *Pat. США US 98 96848 18.08.1998, US 99 37 670617.08.1999.* Цифровая рентгеновская установка для проверки качества сварных швов. — ИСМ, 2003, № 5.
8. *Pat. WO 97 NO 9700225 29.08.1997, NO 963923 19.09.1996 (ЕПВ).* Система для проверки трубопроводов. — ИСМ, 2000, № 15.
9. *Павлий А. В., Белый Н. Г., Бухенский В. Н.* К вопросу применения радиографической пленки FOMADUX RX1 // Матер. 2-й Науч.-практ. конф. «Современные аспекты организации неразрушающего контроля качества про-





- дукции на промышленном предприятии». — Турция, г. Сид, 1–8 мая 2004. — 40 с.
10. *Белый Н. Г., Павлий А. В.* Использование рентгеновских технических пленок для задач контроля в атомной энергетике // Матер. 3-й Науч.-практ. конф. «Организация неразрушающего контроля качества продукции в промышленности». — Турция, г. Аланья (Анталия), 30 апр.–7 мая, 2005. — 56 с.
  11. *Сцинтилляторы* на основе соединений  $A^{IV}B^{VI}$ . Получение, свойства и особенности применения / Н. Г. Старжинский, Б. В. Гринев, Л. П. Гальчинецкий, В. Д. Рыжиков. — Харьков: Ин-т монокристаллов, 2007. — 294 с.
  12. *Гринев Б. В., Рыжиков В. Д., Семиноженко В. П.* Сцинтилляционные детекторы и системы контроля радиации на их основе. — Киев: Наук. думка, 2007. — 447 с.
  13. *Рыжиков В. Д., Лисецкая Е. К., Ополонин А. Д.* Цифровая радиография для технической диагностики сварных конструкций // Междунар. информ.-техн. журн. «Оборудование и инструмент для профессионалов». — 2005, № 10(69). — С. 30–33.
  14. *Многоэлементные детекторы ионизирующего излучения* / М. В. Синьков, В. Д. Сапрыкин, В. Г. Чалая и др. — Киев: Техника, 1985. — 136 с.

Ін-т сцинтиляційних матеріалів НАН України, Харків,  
НДІ «Мікроприладів», Київ

Надійшла до редакції  
16.03.2009

**О. М. Карпаш.** Технічна діагностика бурового та нафтогазового обладнання: Навч. посібник. — Івано-Франківськ, Факел, 2008. — 272 с.

В навчальному посібнику використано напрацьований вітчизняними та закордонними фахівцями досвід у неруйнівному контролі та технічній діагностиці бурового, нафтогазового обладнання та інструменту. Викладено на основі літературних і статистичних даних основні види та причини відмов нафтогазового обладнання. Розглянуто принципи, теоретичні основи, сучасні технології та технічні засоби діагностування стану об'єктів нафтогазового комплексу, в т. ч. бурового і нафтогазового обладнання й інструменту. Також висвітлено питання організаційного, методичного та кадрового забезпечення проведення технічної діагностики обладнання.

Навчальний посібник призначений для студентів технічних вузів нафтогазового профілю. Він також може бути використаний інженерно-технічними працівниками, які займаються виробництвом та експлуатацією бурового нафтогазового обладнання.



**О. М. Карпаш, А. В. Яворський, М. О. Карпаш.** Основи забезпечення якості в нафтогазовій інженерії: Навч. посібник. — Івано-Франківськ, Факел, 2008. — 439 с.

Посібник «Основи забезпечення якості в нафтогазовій інженерії» вдало поєднує питання для досягнення єдиної мети забезпечення якості продукції і послуг у нафтогазовій галузі, а також допоможе студентам ознайомитися з:

- нормативно-правовими та методологічними основами метрології: засобами і методами вимірювань, забезпечення єдності вимірювань;
- системою стандартів у нафтогазовій галузі; системою стандартів із сертифікації нафтогазового обладнання;
- органами метрології і стандартизації та організацією робіт з метрології, стандартизації; державною системою сертифікації і практикою сертифікації в Україні;
- міжнародною та європейською діяльністю в галузі стандартизації та сертифікації, міжнародними стандартами серії ISO 9000 та сертифікацією у зарубіжних країнах.

Навчальний посібник призначений для спеціалістів нафтової та газової промисловості, аспірантів, студентів старших курсів технічних університетів, викладачів, наукових співробітників відповідних спеціалізацій.

**З питань придбання посібників звертатись за адресою: 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15. Тел.: (803422) 4-24-30; e-mail: karpash@nung.edu.ua.**





## БЕСКОНТАКТНАЯ СЕНСОРНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ОЦЕНКИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОФИЛЕЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ

В. А. КОЛЯДА

*Разработаны аппаратные и программные средства двухканальной сенсорной системы для автоматической оценки параметров профиля железнодорожных рельсов. Предложены конструкционные решения для сенсорного блока системы, в который входят два отдельных измерительных оптических канала. Разработана методика калибровки сенсорного блока с помощью плоского шаблона и построено математическое обеспечение для реконструкции профиля рельсов по двум цифровым изображениям.*

*Hardware and software of a two-channel sensor system for automatic evaluation of railway rail profile were developed. Design solutions were proposed for the system sensor block, which includes two separate measurement optical channels. A procedure is developed for calibration of the sensor block using a flat template, and software has been constructed for rail profile reconstruction from two digital images.*

Для обеспечения безопасности движения поездов необходим строгий контроль геометрических параметров железнодорожных рельсов. Одной из основных задач, стоящих перед администрациями железных дорог, является организация систематического измерения параметров пути. Результаты измерений позволяют количественно оценивать степень ухудшения состояния пути, оптимизировать графики текущего содержания и ремонта, устанавливать максимально допустимую скорость движения поездов на конкретных участках. В комплекс мероприятий по определению состояния рельсов входит измерение геометрических параметров каждого рельса отдельно и контроль смещения одного рельса относительно другого. Для количественного измерения параметров выполняется моделирование рельсовых нитей в виде линий в трехмерном пространстве с дальнейшим проецированием этих линий на двумерные плоскости. После завершения измерений каждый результат, представляющий интерес или вызывающий тревогу, локализуется по его фактическому местоположению.

В прошедшем столетии получили развитие разнообразные системы измерения геометрических параметров пути, в частности, с использованием вагонов-путеизмерителей. В этих системах наиболее часто используются механические датчики с подвижными контактами, которые находятся в постоянном соприкосновении с рельсами. По величине смещения контактов определяются геометрические параметры пути. Такие системы представляют собой существенный прогресс по сравнению с ручными измерительными средствами. Однако системы, в которых используются контактные датчики, имеют один общий суще-

ственный недостаток — они не могут обеспечить достаточную точность измерений при движении вагона-путеизмерителя с высокой скоростью, поскольку в этих условиях не сохраняется постоянный контакт датчиков с рельсами. Поэтому для измерения параметров геометрии пути целесообразно использовать бесконтактные датчики. В настоящее время в мире активно ведутся разработки, а также внедрение оптических систем для измерения геометрических параметров рельсов в процессе движения вагона-путеизмерителя [1].

Для исследования процесса бесконтактного измерения геометрических параметров железнодорожных рельсов в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины разработан макет двухканальной сенсорной системы, схема которой представлена на рис. 1. На прямоугольном основании закреплены две консоли (для лазерных генераторов световой плоскости и видеокамер). На торцах каждой консоли имеются цанговые зажимы, надежно фиксирующие оптические узлы. Консоли и зажимы обеспечивают необходимую подвижность оптических узлов при юстировке. Лазерные генераторы световой плоскости и видеокамеры находятся в герметичных кожухах с иллюминаторами, которые обеспечивают механическую защиту важных оптических компонентов. Источником излучения лазерного генератора световой плоскости является полупроводниковый лазерный диод. Лазерный луч с помощью цилиндрической линзы «разворачивается» в световую плоскость, которая при пересечении с объектом образует на его поверхности узкую световую полосу, повторяющую рельеф поверхности. В качестве устройств сбора видеоданных используются черно-белые видеокамеры с ПЗС-матрицей. На видеокамерах установлены специальные объективы, которые дают воз-



возможность изменять фокусное расстояние и, соответственно, поле зрения видеокамер в широком диапазоне. Использование таких объективов позволяет получить четкое изображение необходимого участка объекта при любом из возможных положений видеокамеры. Перед объективами установлены светофильтры, согласованные с длиной волны излучения лазерных диодов, используемых в лазерных генераторах световой плоскости. Светофильтры предназначены для улучшения отношения сигнал-шум путем подавления излучения, которое отличается по длине волны от излучения лазерных диодов. Таким образом, сенсорный блок макета телевизионной системы представляет собой два независимых оптических канала, работающих по триангуляционному принципу. Видеосигналы, получаемые от двух видеокамер, представляют собой исходные данные для реконструкции параметров профиля рельса. В качестве объектов измерения взяты образцы участков железнодорожных рельсов с разными типами и степенью износа.

Юстировка оптических компонентов сенсорного блока включает в себя два важных момента: регулировку взаимного расположения лазерных генераторов световой плоскости для получения максимально возможного совпадения плоскостей их излучения и регулировку ориентации видеокамер и настройку объективов таким образом, чтобы одна видеокамера «видела» верхнюю и левую часть головки рельса, вторая — верхнюю и правую часть. При этом световая полоса, соответствующая контуру рельса, должна занимать не менее 80 % общего масштаба изображения для каждой видеокамеры.

Одной из наиболее важных задач, которую необходимо решить для построения полнофункциональной измерительной оптической системы, является калибровка сенсорного блока. Для данного случая разработана методика калибровки двухканальной телевизионной системы с использованием плоского шаблона, на поверхность которого нанесена сетка с фиксированным размером ячеек. Калибровку сенсорного блока системы можно рассматривать в виде последовательности отдельных этапов. На подготовительном плоский шаблон устанавливается в рабочую зону сенсорного блока. Далее выполняется захват двух изображений сетки шаблона от разных видеокамер с помощью устройства видеозахвата, предназначенного для преобразования аналоговых видеосигналов в цифровые изображения. На следующем этапе выполняется распознавание горизонтальных и вертикальных линий сетки на захваченных изображениях. Здесь решаются задачи фильтрации, бинаризации, сегментации цифровых изображений и группирования выделенных объектов с использованием классических методов и алгоритмов [2, 3]. Для фильтрации изображений используется одномерный фильтр, база которого

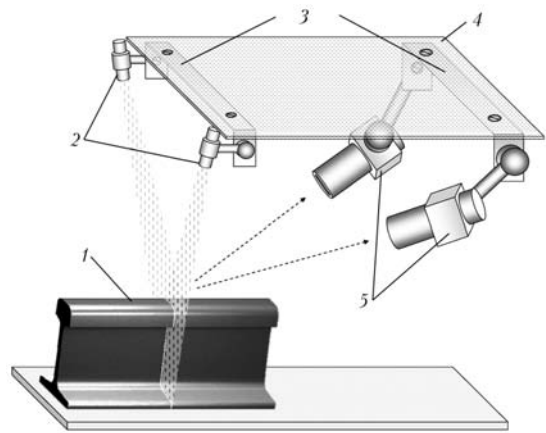


Рис. 1. Схема макета сенсорной системы для экспериментального исследования процесса измерения геометрических параметров рельсов: 1 — объект измерения; 2 — лазерные генераторы световой плоскости; 3 — консоли; 4 — основание; 5 — видеокамеры

согласована со средней толщиной линий сетки на изображениях. Бинаризация для каждого пикселя изображения выполняется на основе порогового уровня, вычисляемого по формуле:

$$\lambda = Mf + Dfk,$$

где  $Mf$ ,  $Df$  — соответственно оценки математического ожидания и дисперсии яркости изображения;  $k$  — коэффициент бинаризации (принято  $k = 2,5$ ).

Задача сегментации заключается в символьном описании подмножеств или объектов. Связное подмножество — это подмножество пикселей, у каждого пикселя которого есть хотя бы один сосед, принадлежащий данному множеству. Для данного случая сегментация изображений выполняется следующим образом. Бинарное изображение обрабатывается в порядке построчной развертки, т. е. слева направо и сверху вниз. При этом обработка крайних пикселей изображения не проводится. Если яркость пикселя  $f(x, y) = 0$ , то осуществляется переход к следующему пикселю изображения. Если  $f(x, y) = 1$ , то выполняется анализ принадлежности пикселя к объектам изображения. В результате последовательного обхода всех пикселей изображения формируется список объектов. При решении задачи группировки для каждого из полученных на предыдущем этапе объектов подсчитывается количество входящих в него пикселей (площадь объекта). Объекты с малой площадью удаляются из списка. Затем для каждого из оставшихся объектов рассчитываются параметры аппроксимирующей прямой (предполагается, что все объекты имеют форму, близкую к прямой линии) и выполняется анализ объектов на принадлежность общей прямой, т. е. объекты, лежащие на общей прямой или «рядом» с ней, объединяются в группу. Для каждой группы объектов вычисляется аппроксимирующая пря-

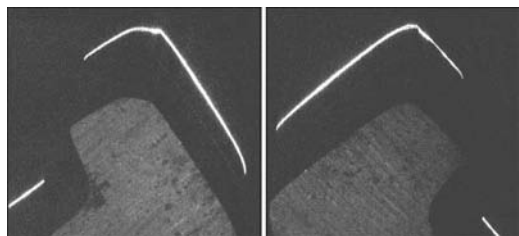


Рис. 2. Изображения от видеокамер сенсорного блока

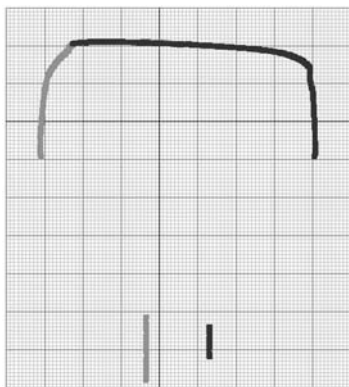


Рис. 3. Результат оценки профиля головки рельса

мая. Найденные точки пересечения горизонтальных и вертикальных аппроксимирующих прямых заносятся в список узлов сетки. Точки из списка узлов разбиваются на группы по девять соседних точек. Для каждой группы из девяти точек на пересечении прямых, проведенных через точки группы, вычисляется новая группа из девяти точек, которая добавляется в список узлов сетки и т. д. Рекурсивное разбиение выполняется до тех пор, пока количество найденных узлов сетки не будет достаточно близким к количеству пикселей на изображении. Следует отметить, что координаты узлов сетки выражены в миллиметрах, поскольку реальный размер ячеек сетки на калибровочном шаблоне известен заранее. Координаты всех точек из списка узлов сетки заносятся в двумерный массив, размер которого соответствует размеру обрабатываемого кадра. Причем в каждый элемент массива записывается та точка, расстояние от которой до пикселя, преобразование которого она представляет, минимально.

Таким образом, в результате калибровки двухканальной сенсорной системы получаем две калибровочные матрицы (для правого и левого канала), которые позволяют осуществлять преобразование из систем координат изображений в опорную систему координат, которая соответствует плоскости калибровочного шаблона. Матрицы, полученные в результате калибровки сенсорного блока, используются математическим обеспечением, предназначенным для оценки параметров

профиля рельсов. Математическое обеспечение осуществляет захват и обработку цифровых изображений, получаемых от двух видеокамер сенсорного блока (рис. 2). При обработке выполняется согласованная фильтрация каждого изображения для выделения контура, соответствующего световой полосе, которая описывает участок профиля объекта измерения. Выделенные контуры представляют собой два массива, содержащие дискретные координаты точек контуров для двух изображений. Также выполняется статистическая обработка полученных массивов, которая позволяет исключить из дальнейшего рассмотрения «ложные» точки контура. Возникновение ложных точек контура связано с возможным наличием локальными засветками рабочей поверхности рельсов от внешних источников, которые не полностью подавляются светофильтрами, расположенными перед объективами видеокамер. Для каждой точки найденных контуров из калибровочных матриц выбираются соответствующие метрические значения координат. Затем полученные значения координат объединяются в один массив, характеризующий геометрические размеры профиля исследуемого объекта. На рис. 3 показан результат компьютерной реконструкции профиля головки рельса с помощью двухканальной сенсорной системы. Участки профиля, полученные от разных видеокамер, показаны в виде сегментов с разной интенсивностью цвета. Получено практически полное совпадение верхних частей головки рельса на общем изображении профиля, что подтверждает корректность разработанной методики калибровки сенсорного блока системы. Также разработан итерационный алгоритм сравнения измеренного профиля рельса с эталоном, позволяющий рассчитывать значения параметров, характеризующих износ головки рельса.

Разработанные аппаратные и программные средства макета двухканальной сенсорной системы и результаты экспериментальных исследований положены в основу создания опытного образца системы автоматической диагностики геометрических параметров железнодорожных путей. В настоящее время работы по созданию опытного образца системы находятся на стадии предварительных испытаний.

1. Zywił J., Oberlechner G. New Rail Measurement System // Intern. Railway J. — 2001. — № 9. — P. 31–35.
2. Цифровая обработка изображений в информационных системах / И. С. Грузман, В. С. Киричук, В. П. Косых // Уч. пособие. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. — 480 с.
3. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. — М.: Мир, 1982. — 155 с.



# ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ СЕГМЕНТАЦИИ РЕНТГЕНТЕЛЕВИЗИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ СВАРНЫХ ШВОВ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ

Я. П. ЛАЗОРЕНКО, Е. В. ШАПОВАЛОВ, Т. Г. СКУБА, Д. Д. ТОПЧЕВ, Ф. С. КЛИЩАР

*Предложено три новых алгоритма сегментации цифровых рентгентелевизионных изображений сварных швов, которые предназначены для автоматического обнаружения дефектов. Данные алгоритмы основаны на адаптивных методах пороговой обработки. Показано, что оптимальное значение порога устанавливается для каждой точки изображения на основе свойств ее локальной окрестности. Для выбора оптимального порогового значения использованы следующие критерии: среднеквадратический, моментный и энтропийный. Экспериментальное исследование показало эффективность предложенных алгоритмов сегментации, что делает возможным их применение в системах автоматизированного рентгентелевизионного контроля.*

*Three new algorithms of segmentation of digital X-Ray TV images of welds have been proposed, which are designed for automatic defect detection. These algorithms are based on adaptive methods of threshold treatment. In these methods the optimum threshold value is set for each image point based on the properties of its local vicinity. Selection of the optimum threshold value was performed on the basis of the following criteria: mean root square, instant and entropy. Experimental study has shown the effectiveness of the proposed segmentation algorithms, which enables their application in systems of automated X-Ray TV inspection.*

В настоящее время ведутся интенсивные работы по созданию систем автоматизированного рентгеновского контроля [1–5]. Основной целью исследований является синтез эффективных алгоритмов расшифровки рентгеновских изображений, обеспечивающих надежное обнаружение и идентификацию дефектов сварного шва. Однако к настоящему времени систему, пригодную для внедрения в производство, реализовать пока не удалось.

Целью данной статьи является исследование эффективности новых алгоритмов сегментации рентгентелевизионных изображений сварных швов, предназначенных для автоматического обнаружения дефектов.

В существующих подходах к обнаружению дефектов сварных швов на рентгеновских изображениях цифровая обработка обычно осуществляется в два этапа [1, 3, 5]. На первом выполняется сегментация рентгеновского изображения. Сегментация представляет собой отделение областей изображения, которые соответствуют дефектам сварного шва, от фона — нормальной структуры шва. Результатом сегментации является двухуровневое (бинарное) изображение, на котором одним уровнем яркости выделяются искомые области, а другим — фон. На втором этапе с помощью методов распознавания образов выполняется классификация выделенных областей на два класса: дефект и ложное обнаружение. На этом этапе из рассмотрения исключаются области, которые не содержат дефектов сварного шва.

Поскольку дефекты являются объектами, выделяющимися на более светлом (или темном) фоне, то для их обнаружения целесообразно применять методы пороговой обработки [6]. В методах пороговой обработки разметка точек изображения на два класса (объект и фон) осуществляется путем сравнения их яркости с некоторым порогом. Если на изображении искомые объекты (дефекты) представляют собой светлые области на более темном окружающем фоне, то при удачном выборе порога их яркость будет превышать пороговое значение, а уровень яркости фона будет ниже этого порога. Так как яркость изображения на разных участках шва, как правило, достаточно сильно изменяется, то на практике применяют методы локальной пороговой обработки, в которых порог выбирается отдельно для каждой точки изображения в зависимости от свойств ее локальной окрестности.

Применяемые в настоящее время алгоритмы сегментации рентгеновских изображений [2, 4, 5] основаны на выделении границ областей дефектов и адаптивной пороговой обработке и построены таким образом, что качество сегментации во многом определяется некоторыми изначально задаваемыми параметрами. Поэтому при одних и тех же значениях параметров для разных дефектов и изображений сварных швов эти алгоритмы могут давать разное качество сегментации. Так как методика выбора оптимальных значений параметров для данных алгоритмов отсутствует и подходящие значения выставляются «вручную», то обеспече-

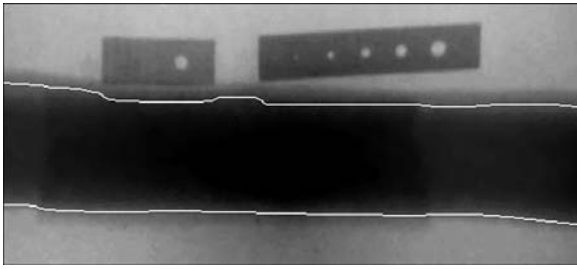


Рис. 1. Выделение области сварного шва с помощью разработанного алгоритма

ние высокого качества сегментации рентгеновских изображений, а следовательно, и корректности выделения дефектов, представляет определенную сложность.

Для обеспечения высокого качества сегментации рентгенотелевизионных изображений в данной работе предлагается использовать адаптивные алгоритмы пороговой обработки, которые способны найти наилучшее значение порога исходя только из распределения яркости на изображении и не требуют для корректности своей работы набора правильно заданных значений параметров.

Перед сегментацией в синтезированных в данной работе алгоритмах цифровой обработки на исходных изображениях осуществляется выделение области сварного шва. Процедура выделения сварного шва основана на алгоритмах пороговой обработки и выделения границ областей. На рис. 1 приведено рентгенотелевизионное изображение, на котором границы сварного шва выделены с помощью разработанного алгоритма белыми линиями. Последующая обработка цифровых изображений проводится в области сварного шва.

Для повышения качества сегментации выполнялась предварительная обработка исходных изображений, которая заключалась в сглаживании шума на изображении и повышении контраста. Для сглаживания шума применяли два пространственных фильтра: медианный [6] и так называемый сигма-фильтр [7]. Применение медианного фильтра обусловлено тем, что он эффективно устраняет импульсный шум, и при этом приводит к меньшему размытию изображения, чем линейные сглаживающие фильтры с маской того же размера [6]. После подавления импульсного шума медианным фильтром осуществлялась фильтрация сигма-фильтром, который сглаживает только однородные по яркости (согласно определенному критерию) участки изображения. Благодаря этому сглаживание и подавление шума выполняется только в областях, соответствующих нормальной структуре сварного шва, а области изображения со значительными перепадами яркости, в которых находятся дефекты, остаются неискаженными.

Медианный фильтр [6] представляет собой пространственный фильтр, который заменяет зна-

чение яркости в заданной точке изображения на медиану ряда яркостей пикселей, лежащих в локальной окрестности этой точки, покрываемой маской фильтра. При этом центральный элемент маски находится в точке, в которой выполняется замена яркости, а маска должна состоять из нечетного количества элементов. Медианой последовательности чисел, состоящей из нечетного количества элементов  $N$ , называется тот ее элемент, для которого существует  $(N - 1)/2$  элементов, меньших или равных ему по величине, и  $(N - 1)/2$  элементов, больших или равных ему по величине. Если последовательность чисел, состоящую из нечетного количества элементов, упорядочить по возрастанию или убыванию, то медианой будет элемент, лежащий в ее центре. Обработка цифрового изображения медианным фильтром состоит в проходе маской фильтра по всем точкам изображения и замещении яркостей точек соответствующими медианами. В данной работе использовали медианный фильтр с квадратной маской размером  $3 \times 3$  точки изображения. Данный фильтр подавляет характерный для рентгенотелевизионных изображений импульсный шум размером  $1 \dots 4$  точки.

Сигма-фильтр [7] представляет собой простейший усредняющий фильтр, осуществляющий сглаживание только однородных по яркости участков изображения, не искажая области с достаточно большими перепадами яркости, в которых могут быть дефекты сварного шва. Яркость заданной точки изображения  $f(x, y)$  ( $f$  — функция яркости) заменяется на среднее значение яркости  $\mu$  ее локальной окрестности, если  $f(x, y) - \mu > 2k\sigma$  и  $N \leq N_{\text{ш}}$ , где  $\sigma$  — среднеквадратическое отклонение шума на изображении;  $k$  — регулировочный параметр,  $k \approx 1$ ;  $N$  — количество точек  $(i, j)$  локальной окрестности, для которых выполняется условие  $f(i, j) - \mu > 2k\sigma$ ;  $N_{\text{ш}}$  — максимальный размер импульсного шума. В данной работе оценка  $\sigma$  для заданного рентгенотелевизионного изображения делается следующим образом. Область сварного шва на изображении разбивается на блоки размером  $20 \times 20$  точек. Для каждого из этих блоков вычисляется среднеквадратическое отклонение. Значение  $\sigma$  вычисляется как медиана последовательности этих среднеквадратических отклонений. На рис. 2 приведен результат обработки сигма-фильтром фрагмента рентгенотелевизионного изображения. Фильтрация осуществлялась со следующими значениями параметров: локальная окрестность размером  $9 \times 9$  точек;  $N_{\text{ш}} = 20$ ;  $k = 1,0$ .

Для повышения контраста рентгенотелевизионных изображений использовали операцию линейного контрастирования [6], которая заключается в линейном растяжении диапазона яркости изображения на полный динамический диапазон, благодаря чему увеличивается контрастность



изображения. Применение этой процедуры связано с тем, что яркость на исходном рентгеновизуальном изображении распределена только на каком-то одном ограниченном участке полного динамического диапазона. После линейного контрастирования повышается общий контраст изображения.

Кроме перечисленных выше процедур цифровой обработки в качестве метода, позволяющего улучшить результаты сегментации, в данной работе исследовали метод вычитания фона [3]. С помощью этого метода осуществляется устранение фоновой составляющей изображения с сохранением информации о дефектах. Процедура вычитания фона состоит в том, что из исходного изображения формируется так называемое изображение фона, на котором исключены или сильно сглажены изображения дефектов. Потом изображение фона вычитается из исходного изображения. На полученном в результате бесфоновом изображении в областях без дефектов уровень яркости приблизительно нулевой (присутствует некоторая шумовая составляющая), а там, где есть дефекты, яркость сохраняется на уровне разности между яркостью дефекта и окружающего его фона. Таким образом, на бесфоновом изображении дефекты могут быть отличены от фона по уровню яркости, а значение яркости может интерпретироваться как мера отклонения от нормальной структуры сварного шва.

Для формирования изображения фона применяли медианную фильтрацию с квадратной маской. Если маска фильтра имеет размеры  $N \times N$ , то на изображении фона будут исключены дефекты с площадью не более половины площади маски, т.е. дефекты, площадь которых не превышает  $N^2/2$  точек изображения. Также корректно будет исключен любой дефект большего размера, если каждый его фрагмент, в процессе фильтрации попадающий в маску фильтра, по площади не превышает  $N^2/2$  точек. Все остальные дефекты, не удовлетворяющие перечисленным выше условиям, при вычислении фона исключены не будут, что приведет к их искажению на бесфоновом изображении. В данной работе использовали маску медианного фильтра размером  $17 \times 17$ , обеспечивающую правильное выявление дефектов, имеющих площадь, не превышающую 144 точки изображения. Такая площадь соответствует размеру дефекта  $12 \times 12$  точек. На рис. 3 показано изображение, полученное в результате применения процедуры вычитания фона. Для наглядности к преобразованному изображению было применено также линейное контрастирование.

Предложенные алгоритмы сегментации рентгеновизуальных изображений основаны на методах локальной пороговой обработки. Значение порога вычисляется для каждой точки изображения на основе гистограммы распределения яркос-

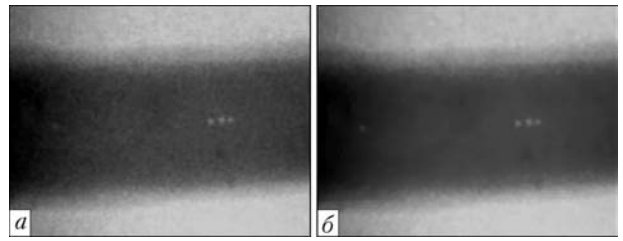


Рис. 2. Применение сигма-фильтра для подавления шума: *a* — исходное изображение; *б* — преобразованное

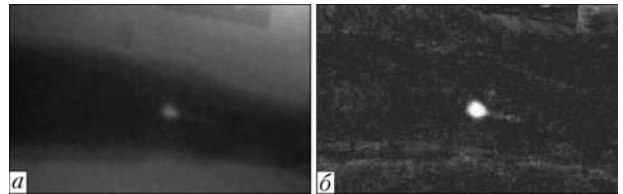


Рис. 3. Процедура вычитания фона: *a* — исходное изображение; *б* — преобразованное

ти в локальной окрестности этой точки. Оптимальный пороговый уровень разделяет гистограмму на две части, которые соответствуют дефекту и фону. Такое разделение гистограммы может быть сделано только в том случае, если гистограмма не является унимодальной, т. е. содержит более чем один локальный максимум. Поэтому в разработанных в данной работе алгоритмах сегментации перед выбором порога для заданной точки изображения осуществляется проверка гистограммы на наличие более чем одного локального максимума. Если гистограмма содержит один локальный максимум, то принимается решение, что соответствующая точка принадлежит фону. Если локальных максимумов более одного, то выполняется пороговая обработка.

В данной работе исследовали три адаптивных алгоритма пороговой обработки, каждому из них соответствует определенный критерий выбора оптимального порога. В этих алгоритмах использовали следующие критерии выбора порога: среднеквадратический, моментный и энтропийный.

Метод пороговой обработки, в котором используется среднеквадратический критерий выбора порога, описан в работе [8]. В нем рассматривается аппроксимация исходного изображения двухуровневым:  $S(x, y) \in \{a_0, a_1\}$ , ( $a_0 < a_1$ ). Согласно этому методу наилучшему порогу соответствует такой, при котором среднеквадратическое отклонение  $\sigma(a_0, a_1, t)$  сегментированного изображения от исходного является наименьшим. Квадрат среднеквадратического отклонения:

$$\sigma^2(a_0, a_1, t) = \sum_{i=1}^{t-1} (i - a_0)^2 p_i + \sum_{i=t}^L (i - a_1)^2 p_i, \quad (1)$$

где  $t$  — значение порога;  $L$  — количество уровней яркости исходного цифрового изображения;  $p_i$  — значение гистограммы яркости исходного изоб-



ражения для  $i$ -го уровня яркости.

Гистограмма яркости рассматривается как оценка распределения вероятностей:

$$p_i = n_i/n; \quad i = 1, 2, \dots, L; \quad p_i > 0; \quad \sum_{i=1}^L p_i = 1, \quad (2)$$

где  $n_i$  — количество точек изображения, имеющих яркость  $i$ ;  $n$  — общее количество точек изображения.

В работе [7] доказано, что

$$\sigma^2(t) = \min_{a_0, a_1} \sigma^2(a_0, a_1, t) = \sigma^2(\mu_0, \mu_1, t) \sum_{i=1}^{t-1} (i - \mu_0)^2 p_i + \sum_{i=t}^L (i - \mu_1)^2 p_i, \quad (3)$$

где

$$\mu_0 = \frac{1}{\omega_0} \sum_{i=1}^t i p_i; \quad \mu_1 = \frac{1}{\omega_1} \sum_{i=t+1}^L i p_i; \quad (4)$$

$$\omega_0 = \sum_{i=1}^t p_i; \quad \omega_1 = \sum_{i=t+1}^L p_i.$$

Следовательно, оптимальному порогу  $t^*$  соответствует наименьшее значение  $\sigma^2(t)$ .

Моментный критерий выбора порога [8] основан на рассмотрении моментов  $m_j$  от первого до третьего порядка исходного изображения  $f(x, y)$ :

$$m_j = \sum_{i=1}^L (i)^j p_i, \quad j = 1, 2, 3. \quad (5)$$

Оптимальным считается порог, обеспечивающий равенство соответствующих моментов сегментированного и исходного изображений. Моменты сегментированного изображения  $g(x, y)$  имеют вид:

$$m'_j = \sum_{l=0}^1 (a_l)^j \omega_l, \quad j = 1, 2, 3, \quad (6)$$

где  $a_0, a_1$  — представительные уровни яркости сегментированных областей  $S(x, y)$ . Оптимальное значение порога  $t^*$  определяется из условия  $m'_j = m_j$  для  $j = 1, 2, 3$ .

Принимая во внимание, что  $\omega_0 + \omega_1 = 1$ , условие равенства первых трех моментов можно записать в виде системы уравнений:

$$\begin{aligned} \omega_0 + \omega_1 &= 1, \quad \omega_0 a_0 + \omega_1 a_1 = m_1, \\ \omega_0 a_0^2 + \omega_1 a_1^2 &= m_2, \quad \omega_0 a_0^3 + \omega_1 a_1^3 = m_3. \end{aligned} \quad (7)$$

В рассматриваемом случае алгоритм решения системы (7) сводится к решению системы линейных уравнений относительно вспомогательных переменных  $b_0$  и  $b_1$ :

$$\begin{aligned} b_0 + b_1 m_1 &= -m_2, \\ b_0 m_1 + b_1 m_2 &= -m_3, \end{aligned} \quad (8)$$

решению квадратного уравнения  $a^2 + b_1 a + b_0 = 0$ , дающего значения представительных уровней яркости  $a_0, a_1$ , и, наконец, к подстановке этих значений в первые два уравнения (7) для получения значений  $\omega_0$  и  $\omega_1$ . Значение  $\omega_0$  позволяет определить оптимальный порог  $t^*$ , минимальный из удовлетворяющих неравенству:

$$\omega_0 \leq \sum_{i=1}^t p_i. \quad (9)$$

Энтропийный критерий к выбору порога [8] состоит в следующем. Если изображение состоит из двух классов однородных по яркости точек, то оптимальным порогом  $t^*$ , разбивающим изображение на эти два класса, будет порог, при котором энтропии распределений яркости полученных частей изображения будут максимальны. Энтропии  $H_0$  и  $H_1$  каждого из этих распределений определяются выражениями:

$$H_0 = \log_2 \omega(t) + \frac{H(t)}{\omega(t)}, \quad (10)$$

$$H_1 = \log_2 [1 - \omega(t)] + \frac{H(L) - H(t)}{1 - \omega(t)}, \quad (11)$$

где  $H(t) = - \sum_{i=1}^t p_i \log_2 p_i$ ,  $H(L) = - \sum_{i=1}^L p_i \log_2 p_i$  — частичная и полная энтропии гистограммы  $\{p_i\}$ ,  $i = 1 \dots L$ ;  $\omega(t) = \sum_{i=1}^t p_i$ .

Для нахождения наилучшего значения порога используется следующая критериальная функция:

$$\psi(t) = H_0 + H_1. \quad (12)$$

Поскольку каждое из слагаемых  $H_0$  и  $H_1$  характеризует равномерность распределения яркостей на соответствующих интервалах и резко уменьшается при попадании в данный интервал «чужого» фрагмента гистограммы, максимум функции  $\psi(t)$ , достигаемый при некотором значении  $t^*$ , будет соответствовать наилучшему варианту сегментации.

Результаты сегментации фрагмента рентгено-телевизионного изображения с помощью трех предложенных алгоритмов пороговой обработки





приведены на рис. 4. В качестве локальной окрестности при выборе порога использовали окно размером 11×11 точек изображения.

Для оценки эффективности предложенных алгоритмов сегментации рентгенотелевизионных изображений провели экспериментальное исследование, в котором оценивали качество сегментации набора тестовых изображений. В качестве тестовых образцов использовали четыре цифровых рентгенотелевизионных изображения сварных швов труб большого диаметра (рис. 5), предоставленных Харцызским трубным заводом. Разработанные алгоритмы цифровой обработки были реализованы в виде программного модуля на языке C++.

Оценку качества сегментации тестовых изображений проводили на основе следующих критериев:

- на результирующем бинарном изображении должны быть выделены все дефекты;
- форма выделенных дефектов на бинарном изображении должна соответствовать форме дефектов на исходном изображении.

Степень соответствия формы выделенных областей на бинарном изображении форме дефектов на исходном изображении оценивали визуально.

Предварительную обработку тестовых изображений выполняли в такой последовательности: медианная фильтрация; сигма-фильтрация; линейное контрастирование; вычитание фона.

Полученные после сегментации бинарные изображения обрабатывали медианным фильтром с маской размером 3×3 для исключения отдельных шумовых точек.

В результате проведенных исследований установлено, что все три алгоритма сегментации рентгенотелевизионных изображений корректно (согласно двум сформулированным выше критериям) выделяют области с дефектами. На тестовых изображениях были выделены все дефекты. Форма выделенных областей соответствовала (с точки зрения визуальной оценки) форме изображений самих дефектов. Все три алгоритма при проверке на тестовых изображениях показали одинаковое качество сегментации. На рис. 6 приведен результат сегментации одного тестового изображения с помощью трех предложенных алгоритмов сегментации.

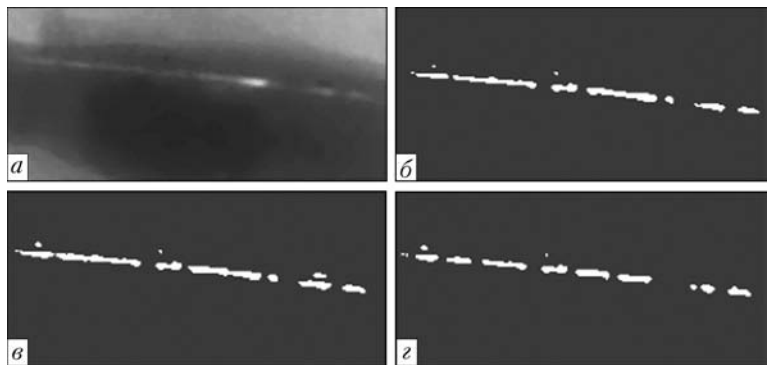


Рис. 4. Адаптивная пороговая обработка с помощью трех предложенных алгоритмов: *a* — исходное изображение; *б* — выбор порога по средневзвешенному критерию; *в* — моментный подход к выбору порога; *г* — энтропийный метод выбора порога

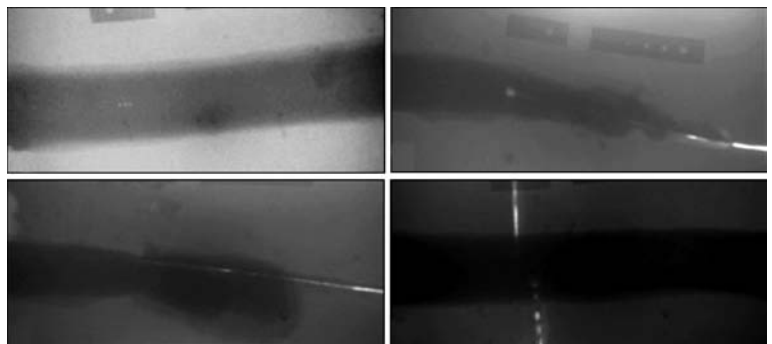


Рис. 5. Тестовые изображения сварных швов, которые использовались для оценки эффективности предложенных алгоритмов сегментации рентгенотелевизионных изображений

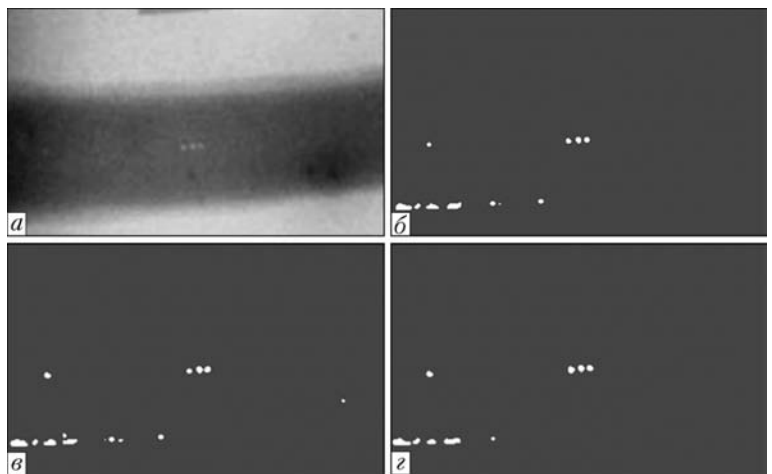


Рис. 6. Результат сегментации тестового изображения с помощью трех предложенных алгоритмов с применением вычитания фона: *a* — исходное изображение; *б* — средневзвешенный алгоритм; *в* — моментный алгоритм; *г* — энтропийный алгоритм

Исходя из проведенных исследований можно сделать выводы, что предложенные алгоритмы сегментации рентгенотелевизионных изображений сварных швов являются эффективными. Высокая эффективность данных алгоритмов делает перспективным их применение для обнаружения дефектов сварных швов в системах автоматизированного рентгенотелевизионного контроля.

1. Лазоренко Я. П. Автоматическое распознавание дефектов на радиационных изображениях сварных швов (Об-



- зор) // Техн. діагностика и неразруш. контроль. — 2008. — № 3. — С. 31–37.
2. *Alghalandis S., Alamdari G.* Welding defect pattern recognition in radiographic images of gas pipelines using adaptive feature extraction method and neural network classifier // 23rd World gas conference, 2006.
  3. *Wang G., T. W. Liao.* Automatic identification of different types of welding defects in radiographic images // NDT&E International. — 2002. — № 35. — P. 519–528.
  4. *Weld defect detection in industrial radiography based digital image processing / N. Nacereddine, M. Zelmat, S. S. Belaiifa, M. Tridi* // Proc. of world academy of science, engineering and technology. — 2005. — January. — 2. — ISSN 1307-6884.
  5. *Mery D., Berti M. A.* Automatic detection of welding defects using texture features // Intern. symp. on computed tomography and image processing for industrial radiology, 2003.
  6. *Гонсалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений. — М.: Техносфера, 2006. — 1072 с.
  7. *Бакут П. А., Колмогоров Г. С.* Сегментация изображений: методы выделения границ областей // Зарубежная радиоэлектроника. — 1987. — № 10. — С. 25–47.
  8. *Бакут П. А., Колмогоров Г. С., Ворновицкий И. Э.* Сегментация изображений: методы пороговой обработки // Там же. — 1987. — № 10. — С. 6–24.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины,  
Киев

Поступила в редакцию  
10.10.2008

**Назарчук З. Т., Скальський В. Р.** Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій: Наук.-техн. посібник. У 3 т. — Київ: Наук. думка, 2009.

### **Т.1. Теоретичні основи методу акустичної емісії. — 287 с.**

У монографії викладено основи поширення пружних хвиль у твердому тілі з позицій теорії пружності. Описано особливості їх проходження у стрижнях і пластинах, взаємодії з різними включеннями, несучільностями, вільними поверхнями. Класифіковано й детально описано найпоширеніші типи пружних хвиль, які застосовують для проведення неруйнівного контролю методом акустичної емісії з метою діагностування виробів та елементів конструкцій. На засадах основних положень механіки руйнування викладено взаємозв'язок зародження й розвитку тріщин у твердих тілах із хвильовими процесами, які супроводжують ці явища. Наведено розрахункові моделі та розв'язки низки нестационарних динамічних задач теорії тріщин, проілюстровано залежності між характеристиками тріщин і параметрами сигналів акустичної емісії.

### **Т.2. Методологія акустико-емісійного діагностування. — 263 с.**

Розглянуто методичні особливості добору і реєстрування сигналів акустичної емісії в умовах лабораторних досліджень та експлуатації об'єктів контролю. Описано методики визначення міцнісних характеристик, статичної тріщиностійкості конструкційних матеріалів. Розглянуто методологічні основи оцінки їх об'ємної пошкодженості за параметрами акустичних сигналів. Показано інваріантність акустико-емісійного вимірювання об'ємного пошкодження матеріалів стосовно товщини матеріалу, способу його навантаження, типу випробовуваних зразків. Наведено методики встановлення базових характеристик конструкційних матеріалів для запропонованих критеріїв і моделей. Викладено методичний підхід, що ґрунтується на новому критерії оцінювання типів руйнування матеріалів на етапі субкритичного розвитку. Підтверджено ефективність створеного методологічного підґрунтя щодо визначення зародження і розвитку руйнування на різних конструкційних матеріалах: сталях (у вихідному стані й після тривалого експлуатування), чавунах, алюмінієвих сплавах, бетони, залізобетони, композитних матеріалах тощо.

### **Т.3. Засоби та застосування методу акустичної емісії. — 327 с.**

Описано підходи до побудови акустико-емісійної апаратури різного функціонального призначення. Розглянуто особливості застосування первинних перетворювачів пружних хвиль у електричні сигнали, найуживаніші конструкційні матеріали для їх виготовлення, класифікацію перетворювачів за різними ознаками й особливостями конструкційного виконання. Наведено принципові електричні схеми основних вузлів і блоків портативних засобів відбору, обробки і зберігання акустико-емісійної інформації, отриманої під час виконання діагностичних робіт, опис їх функціонування та основні технічні характеристики. Продемонстровано ефективність методу на прикладі реального діагностування низки великогабаритних конструкцій тривалої експлуатації.

Для наукових працівників та інженерів-дослідників, а також аспірантів і студентів вищих навчальних закладів зі спеціальностей діагностика матеріалів і конструкцій, методи неруйнівного контролю, фізична акустика, механіка руйнування тощо.

**3 питань придбання посібників звертатися за тел.: 0322-63-12-64, Скальський В. Р.**



# МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ РЕШАЮЩИХ ПРАВИЛ ПРИ МНОГОПАРАМЕТРОВОМ НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ

О. А. ГИЛЕВА, В. С. ЕРЕМЕНКО

*Рассмотрены вопросы построения решающих правил для неразрушающего контроля композитных материалов. С помощью линейных методов распознавания построены разделяющие гиперплоскости, позволяющие с высокой достоверностью определять аномальные участки изделий и проводить классификацию дефектов. Рассмотрен метод выбора информативных параметров и определение их оптимального количества. Предложен алгоритм распознавания видов дефектов.*

*Article describes questions of decision rules building for nondestructive testing of composite materials. The separating hyperplanes built by linear recognizing methods, allows to high accuracy determine abnormal material areas and perform defects classification. Also article describes method of choice information parameters and their optimal quantity. Algorithm of defects recognizing offered too.*

Композиционные материалы чаще всего формируются одновременно с изделием и являются многослойными разнородными структурами, что значительно усложняет проведение их неразрушающего контроля (НК). Для таких материалов и изделий разрабатываются комплексные методы контроля, которые базируются на использовании нескольких физических методов или дополнительных информативных параметров. Это обуславливает необходимость разработки методик обоснованного выбора диагностических признаков и построения соответствующих решающих правил.

В теории распознавания образов существует несколько основных подходов к решению задачи построения решающих правил [1]. Подход, основанный на распознавании образов с помощью функций расстояния, эффективен в том случае, когда классы образов имеют тенденцию к проявлению кластеризационных свойств и неэффективен, если сравниваемые классы имеют разную дисперсию, а их законы распределения — точки пересечения. Статистический подход основан на применении отношения правдоподобия и требует априорного знания законов распределения исследуемых сигналов. Поэтому в данной работе для задач НК предлагается использовать итеративные классификаторы образов, позволяющие строить разделяющие гиперплоскости между множеством признаков, соответствующих различным состояниям объекта контроля. Решающие функции этих классификаторов строятся по заданной выборке образов с помощью «обучающих» алгоритмов. Предлагаемые алгоритмы просты в реализации и не требуют большого объема экспериментальных данных.

**Теоретические сведения.** Разделяющую функцию (или гиперплоскость) в пространстве признаков при диагностике на два состояния  $D_1$  и  $D_2$  (соответственно бездефектная зона и зона с дефектом) можно представить в виде скалярного произведения [2]

$$f(\bar{x}) = \lambda \bar{x}, \quad (1)$$

где  $\bar{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$  — вектор признаков;  $\lambda$  — весовой вектор.

Вектор  $\lambda$  однозначно определяет положение разделяющей плоскости в пространстве признаков, поэтому задача построения разделяющей поверхности фактически сводится к поиску значения вектора  $\lambda$ . Если существует обучающая последовательность, т. е. эталонная совокупность образцов с известным диагнозом, то ее можно применить для построения весового вектора, а значит, и разделяющей гиперплоскости. При расчетах используется итеративный алгоритм последовательных приближений, при предоставлении нескольких образцов из обучающей совокупности образов. В общем виде эту процедуру можно представить таким образом: при предоставлении каждого образца из обучающей последовательности  $x_{(1)}, x_{(2)}, \dots, x_{(n)}$  происходит коррекция вектора  $\lambda$ :

$$\lambda_{(n+1)} = \lambda_{(n)} + r_{(n+1)} x_{(n+1)} \quad (2)$$

В равенстве (2)



$$r_{(n+1)} = \begin{cases} 0 & \text{для } \lambda_{(n)}x_{(n+1)} > 0 \\ 1 & \text{для } \lambda_{(n)}x_{(n+1)} < 0 \end{cases} \text{ при } x_{(n+1)} \in D_1,$$

$$r_{(n+1)} = \begin{cases} -1 & \text{для } \lambda_{(n)}x_{(n+1)} > 0 \\ 0 & \text{для } \lambda_{(n)}x_{(n+1)} < 0 \end{cases} \text{ при } x_{(n+1)} \in D_2. \quad (3)$$

Другими словами, при неправильном распознавании образов к вектору  $\lambda_{(n)}$  прибавляется значение точки, относительно которой была сделана ошибка. В соответствии с теоремой Розенבלата и Новикова [2] эта процедура последовательных приближений приводит к определению весового вектора за конечное число шагов итерации.

Условие разделения признаков для построенной гиперплоскости имеет вид

$$f(\bar{x}^*) = \lambda \bar{x}^* > 0 \text{ при } \bar{x}^* \in D_1,$$

$$f(\bar{x}^*) = \lambda \bar{x}^* < 0 \text{ при } \bar{x}^* \in D_2.$$

Для построения решающего правила по приведенному алгоритму необходимо определить критерий отбора наиболее информативных признаков. Для этого предлагается использовать информативный подход, изложенный в работе [3].

Определить количество полученной информации с увеличением количества использованных для диагностики параметров (признаков) можно по следующей формуле:

$$I = \frac{1}{2} \log \left\{ 1 + \left( (n-3) \sum_{i=1}^p \varepsilon_i^2 \right) / \left( (n-1) \left[ 4 + 8p/n \sum_{i=1}^p \varepsilon_i^2 \right] \right) \right\}, \quad (4)$$

где  $n$  — объем выборки;  $p$  — количество признаков;

$$\varepsilon_i^2 = (\mu_i^{(1)} - \mu_i^{(2)})^2 / d_i, \quad (5)$$

$\mu_i^{(1)}, \mu_i^{(2)}$  — математические ожидания классов;  $d_i$  — дисперсия признаков.

Для получения оптимального результата при построении решающего правила необходимо использовать признаки, обеспечивающие наибольший прирост информации.

**Экспериментальные исследования.** В качестве физического метода НК, который использовался для получения множества экспериментальных данных, выбрали метод низкоскоростного удара. При проведении исследований энергия ударного взаимодействия изменялась по случайному закону с равномерным распределением. Таким образом имитировалось большое количество измерений информативных параметров в бездефектной зоне и зонах с дефектами. Эксперименты проводили на образцах сотовых панелей с напол-

нителем типа ИСП-1 и обшивкой на основании стеклоткани Т42/1-76. Моделями дефектов выступали зоны с повреждениями, нанесенными точечными разрушающими ударами с энергиями 2,3; 2,8; 3,2 и 5,1 кДж [4].

Информативным признаком, по которому проводили контроль образцов, являлось изменение формы импульса силы ударного взаимодействия, которое численно может быть описано с помощью спектрального разложения по ортогональным функциям. Для построения ортогонального базиса использовали функции Хаара  $\{H(N, m, t)\}$ . Эти функции образуют периодическую, ортонормированную и полную систему функций [5]. Вид функции Хаара приведен на рис. 1. При построении базиса использовано следующее рекуррентное соотношение:

$$H(0, 0, t) = 1 \text{ при } t \in [0, 1),$$

$$H(r, m, t) = \begin{cases} 2^{r/2} & \text{при } \frac{m-1}{2^r} \leq t < \frac{m-1/2}{2^r}, \\ -2^{r/2} & \text{при } \frac{m-1/2}{2^r} \leq t < \frac{m}{2^r}, \end{cases}$$

где  $0 \leq r < \log_2 N, 1 \leq m \leq 2^r$ .

Исследования проводили по результатам измерений 250 случайных реализаций, полученных в бездефектной зоне, и по 250 реализациям, полученным в четырех зонах с различными степенями ударных повреждений. В качестве диагностических признаков выбраны первые 10 коэффициентов разложения, так как они соответствуют более чем 90 % энергии исследуемых сигналов (рис. 2).

Для построения гиперплоскости, разделяющей диагностические признаки, соответствующие бездефектной зоне и зонам со всеми рассмотренными

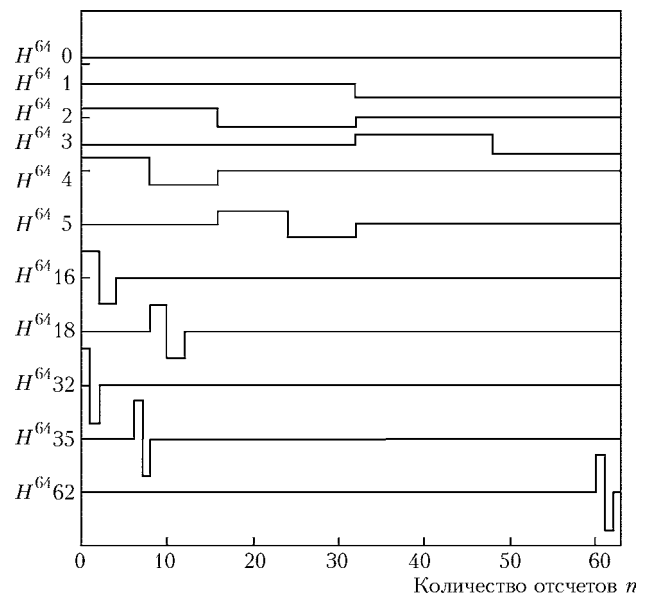


Рис. 1. Функции Хаара

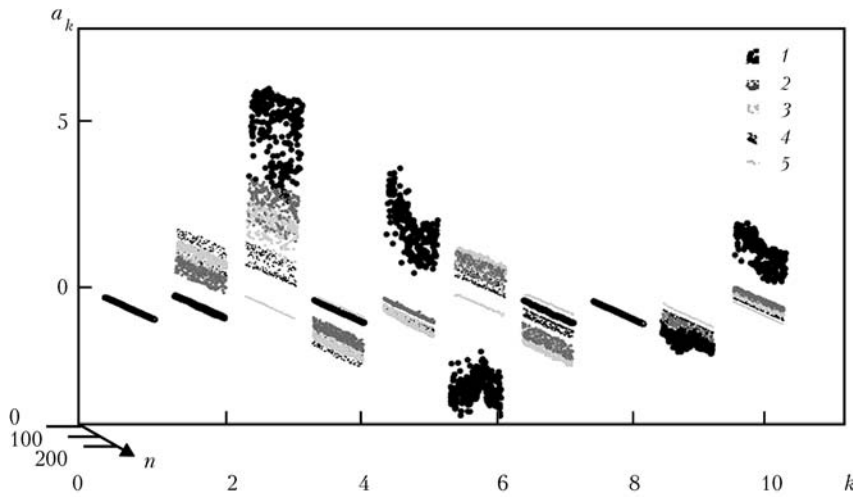


Рис. 2. Коэффициенты разложения информационных сигналов в базисе Хаара:  $n$  — номер импульса ударного взаимодействия;  $a_k$  — коэффициент разложения по базису Хаара;  $k$  — номер коэффициента разложения. Спектры сигналов: 1 — в бездефектной зоне; 2–5 — в зонах с разными разрушающими ударами А, кДж, соответственно 2,297; 2,812; 3,240; 5,109

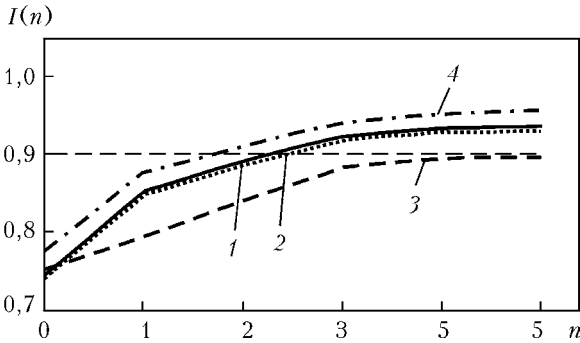


Рис. 3. Изменение информативности с увеличением количества коэффициентов разложения при сравнении сигнала в бездефектной зоне и в зонах с дефектами 1–4

видами дефектов, необходимо отобрать те коэффициенты разложения, которые во всех дефектных зонах принимают значения, лежащие по одну сторону от значений, полученных в бездефектной зоне. В противном случае построение такой гиперплоскости не представляется возможным.

На основе анализа спектрограммы, приведенной на рис. 2, были отобраны шесть спектральных коэффициентов по которым можно линейно разделить информативные признаки, соответствующие бездефектной зоне и зонам с дефектами. Это коэффициенты с номерами 1, 2, 4, 5, 8 и 9.

Таблица 1. Значение величины  $\varepsilon_i^2$  между сигналами в бездефектной зоне и зонах с дефектами

Номер зоны с дефектом/разрушающий удар А, кДж	1	2	4	5	8	9
1/2,3	80,42	12,85	39,34	120,02	5,00	37,51
2/2,8	75,76	13,82	38,85	119,95	5,27	37,95
3/3,2	26,62	14,82	39,13	125,11	5,23	38,30
4/5,1	83,91	16,01	39,30	139,88	6,03	38,50

Для ранжирования отобранных коэффициентов по чувствительности к наличию дефектов в контролируемой зоне по формуле (5) вычислено величину  $\varepsilon_i^2$ , которая фактически определяет информативность каждого коэффициента разложения (табл. 1) при линейном разделении сигналов.

По данным табл. 2 можно упорядочить спектральные коэффициенты по информативности — 5, 1, 4, 9, 2, 8. Прирост информативности распознавания с увеличением количества использованных для диагностики коэффициентов разложения определен по формуле (4) и графически представлен на рис. 3.

С использованием рассмотренного итеративного метода построены две разделяющие гиперплоскости: первая — по трем наиболее информативным коэффициентам разложения — 5, 1 и 4; вторая — по трем менее информативным — 9, 2 и 8. Полученные уравнения гиперплоскостей и необходимое для их построения количество итераций приведено в табл. 2.

Как видно из табл. 2, для разделения бездефектной зоны и зон с дефектами с помощью итеративного алгоритма удалось построить разделяющие гиперплоскости и по более информативным спектральным коэффициентам (5; 1; 4), и по тем, которые имеют меньшую информативность (9; 2; 8), однако при построении гиперплоскости по менее информативным понадобилось в 15 раз больше итераций для сходимости алгоритма.

Эффективность разделения информативных признаков с помощью построенных гиперплоскостей была экспериментально проверена по 125 реализациям, полученным при контроле бездефектной зоны и зон с различной степенью повреждения. Во всех случаях обе гиперплоскости позволили провести правильную классификацию, т. е. разделить значения диагностических признаков, соответствующих бездефектной зоне, от значений, соответствующих дефектным зонам.

Таким образом, построенные по трем диагностическим признакам (даже наименее информативным) гиперплоскости позволяют проводить эф-

Таблица 2. Уравнения разделяющих гиперплоскостей

Спектральный коэффициент	Уравнение гиперплоскости	Количество итераций
5, 1, 4	$f(x) = -2,15x_5 + 0,07x_1 + 2,2x_4$	2
9, 2, 8	$f(x) = 10,77x_9 - 1,53x_2 + 0,57x_8$	30



Таблица 3. Значения информативности коэффициентов разложения при разделении видов дефектов

Номер дефектной зоны	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1, 2, 3	2,4	9,6	2,3	10,0	51,6	0,65	2,30	7,50	0	7,7
2, 3	3,0	0,3	17,0	0,10	0,87	9,09	42,4	65,6	4,3	15,9
3, 4	27,5	4,6	57,7	93,6	10,6	46,2	89,1	19,9	22,9	66,2

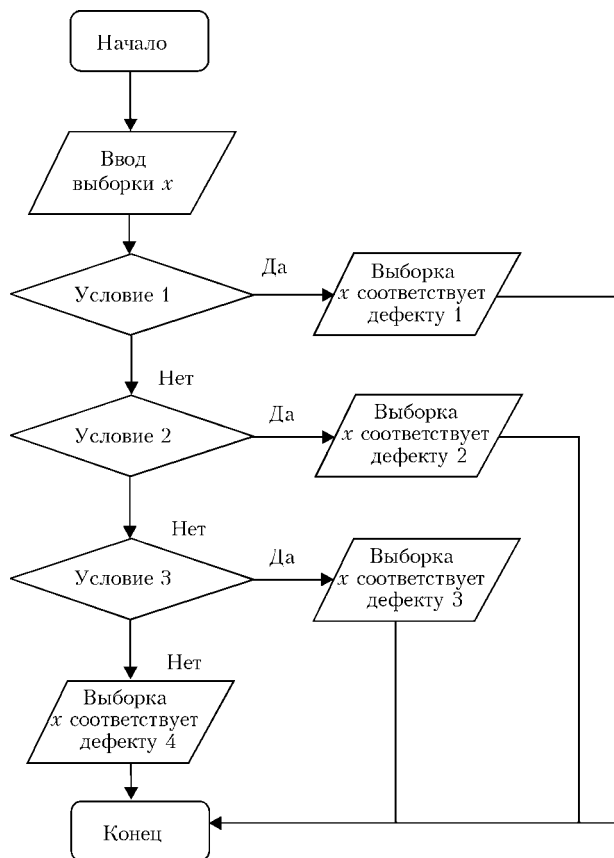


Рис. 4. Алгоритм распознавания дефектов

фективное диагностирование, т. е. различать бездефектные зоны и зоны с дефектами. Предлагаемый подход имеет смысл применить не только для определения наличия дефекта в контролируемой зоне, но и классификации типа дефекта. В этом случае сначала нужно определить, содержит ли контролируемая зона дефект 1 вида, потом 2 и т. д. Для этого необходимо построить несколько разделяющих гиперплоскостей между всеми дефектами, и если это возможно, то реализовать следующий алгоритм классификации, приведенный на рис. 4. Он будет действующим при условии, что разделяющая гиперплоскость между 1 и 2 видами дефектов есть также разделяющей гиперплоскостью между 1 и всеми остальными дефектами, а также гиперплоскость между 2 и 3 видами дефектов отделяет от 2 также 4 вид дефекта.

В приведенном алгоритме «Условие 1» — вектор информативных параметров  $X$  — отвечает 1 виду дефекта по результатам проверки по гипер-

Таблица 4. Уравнения гиперплоскостей между различными типами дефектов

Номер дефектной зоны	Номер коэффициента	Уравнение гиперплоскости	Количество итераций
1, 2	4, 3, 1	$f(x) = 2,92x_4 - 0,41x_3 + 0,05x_1$	16
2, 3	7, 6, 2	$f(x) = 0,84x_7 - 4,8x_6 + 1,36x_2$	32
3, 4	3, 6, 9	$f(x) = -1,48x_3 + 0,48x_6 + 0,17x_9$	2

плоскости между 1 и 2 видами дефектов; «Условие 2» — выборка  $X$  — 2 виду дефекта по результатам проверки по гиперплоскости между 2 и 3 видами дефектов; «Условие 3» — выборка  $X$  отвечает — 3 виду дефекта по результатам проверки по гиперплоскости между 3 и 4 видами.

Таким образом, для реализации предложенного последовательного алгоритма классификации четырех видов дефектов необходимо построить три разделяющие гиперплоскости.

Для определения оптимального количества коэффициентов разложения, необходимых для построения каждой из гиперплоскостей и ранжирования их по информативности, проведем вычисления, аналогично приведенным выше (табл. 3).

По полученным данным для каждого условия классификации отобраны три наиболее информативные спектральные коэффициенты. По ним построены разделяющие гиперплоскости, которые отвечают различным типам дефектов. Полученные уравнения гиперплоскостей и количество итераций, необходимых для их построения, приведены в табл. 4.

Как видно из табл. 4, удалось построить все три гиперплоскости за конечное количество шагов итерации. Проверка разработанного классификатора по 125 экспериментальным реализациям, полученным в дефектных зонах с различными энергиями повреждающих ударов, показала правильность построения разделяющих гиперплоскостей, что подтверждается отсутствием ошибок распознавания.

### Выводы

Проведенные исследования показали эффективность применения линейных разделяющих функций для построения решающих правил в многопараметровой дефектоскопии. С помощью разработанного алгоритма можно не только провести



разделение контролируемых зон на дефектные и бездефектные, но и осуществить классификацию вида обнаруженного дефекта.

Вследствие того, что при построении разделяющих гиперплоскостей использовали диагностические параметры, наиболее чувствительные к наличию определенных видов дефектов, а также учитывали разброс их значений, вызванный неоднородностью контролируемых материалов, предложенная методика позволяет разрабатывать решающие правила, обеспечивающие более высокую достоверность контроля по сравнению с пороговыми правилами.

1. Ту Дж., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов / Пер. с англ. // Под. ред. Ю. И. Журавлева. — М.: Мир, 1978. — 411 с.
2. Биргер И. А. Техническая диагностика. — М.: Машиностроение, 1978. — 240 с.
3. Шапов П. Ф., Осина Т. Г. Оптимизация системы информационных показателей при метрологической неопределенности показателей контроля // Метрологія та вимірювальна техніка: Наук. пр. V Міжн. наук.-техн. конф. — Харків, 2006. — С. 368–371.
4. Еременко В. С., Мокийчук В. М., Овсянкин А. М. Обнаружение ударных повреждений сотовых панелей методом низкоскоростного удара // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2007. — № 1. — С. 124–127.
5. Еременко В. С., Мокийчук В. М., Самойличенко О. В. Исследование характеристик импульсных сигналов на основе разложений по базису Хаара // Восточно-европейский журнал передовых технологий. — 2006. — № 1(19). — С. 142–144.

Нац. авиационный ун-т,  
г. Киев

Поступила в редакцию  
16.02.2009

### **Система автоматического обнаружения валика усиления сварного шва и управления дозатором полимера при нанесении антикоррозийного покрытия на поверхность сварных труб**



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

Система внедрена в производство на предприятии  
ОАО «Харцызский трубный завод» (Украина, 2008 г.).

**Институт электросварки им. Е. О. Патона НАНУ**  
E-mail: office@paton.kiev.ua



## НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ОБЕЧАЕК СОСУДОВ С МЕСТНЫМИ УТОНЕНИЯМИ СТенок

В. М. ДОЛИНСКИЙ, В. И. ЧЕРЕМСКАЯ

*На основе теории предельного равновесия рассмотрена несущая способность обечаек с локальными утонениями стенок. Приведены зависимости, которые в определенной области параметров согласуются с ранее полученными рекомендациями инструкции B31G-1991 ASME. Даны примеры оценки работоспособности промышленных сосудов с местными повреждениями стенки.*

*Load-carrying capacity of shells with local wall thinning is considered on the basis of the theory of limit equilibrium. Simple dependencies are given, which in a certain parameter range agree with earlier specified recommendations of B31G-1991 ASME Guidelines. Examples of evaluation of performance of industrial vessels with local wall damage are given.*

Местные утонения стенки сосуда, работающего под давлением, связаны с коррозионно-эрозионными повреждениями, а также наличием несплошностей, расслоением металла, механическими повреждениями и другими дефектами проката. Если толщина стенки в ослабленной зоне меньше расчетной толщины  $S_p$ , а линейные размеры зоны утонения выходят за пределы окружности, диаметр  $d_{ор}$  которой не требует укрепления [1, 2], то выполняются ремонт сосуда в ослабленной зоне.

Однако существуют методики оценки работоспособности трубопроводов, размер зоны коррозионного износа которых значительно превышает  $d_{ор}$  [3, 4]. В методике ASME рассматривается схема бесконечной оболочки с зоной утонения длиной  $2l$ , глубиной  $h$  (рис. 1) с параметром оболочки  $\gamma = a/S_p$ .

Методика ASME основана на обработке экспериментов, выполненных более чем на 250 фрагментах трубопроводов, изготовленных из углеродистой стали (аналоги — сталь Ст3 и сталь 20) и низколегированной стали (аналоги — стали 09Г2С и 16ГС) с локальными утонениями стенки. Указанные модели подвергали нагружению внутренним давлением и доводили до разрушения. В результате удалось получить эмпирическую зависимость (рис. 2), представленную кривой 2 и двумя отрезками прямых, ограничивающими область допустимых параметров повреждения:

$$\lambda = l/\sqrt{DS_p}, \quad \theta = h/S_p, \quad (1)$$

где  $D$  — внутренний диаметр сосуда;  $\theta$  — глубина повреждения.

На рис. 2 также показаны прямая 1, соответствующая диаметру отверстия, не требующего укрепления; кривая 4 допустимого утонения стенки при установке кольцевых ребер [1] и кривая 3 [4], построенная на предположении о возможности

аппроксимации зоны коррозионного повреждения конусом, объем которого равен объему цилиндра, не требующего укрепления. По-видимому, указанное допущение маловероятно, что привело к необоснованному увеличению зоны допустимых параметров повреждения.

Можно полагать, что методика ASME достаточно обоснована большим объемом экспериментальных данных. В то же время существуют два обстоятельства, сдерживающие ее распространение на расчет обечаек сосудов. Во-первых, эксперименты проводили на трубах с параметром оболочки  $4,6 \leq \gamma \leq 74$ . Для промышленных сосудов указанный параметр обычно находится в пределах  $10 \leq \gamma \leq 500$ . Во-вторых, в методике ASME не указано значение угла  $\alpha$ , а лишь сказано, что зона повреждения обычно вытянута вдоль образующей. В ряде случаев при избирательной коррозии

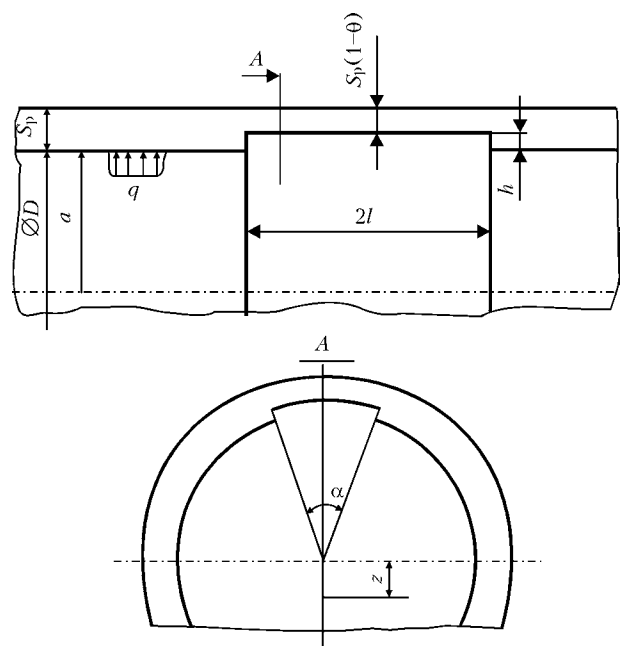


Рис. 1. Схема бесконечной оболочки с ослабленным участком  $2l$



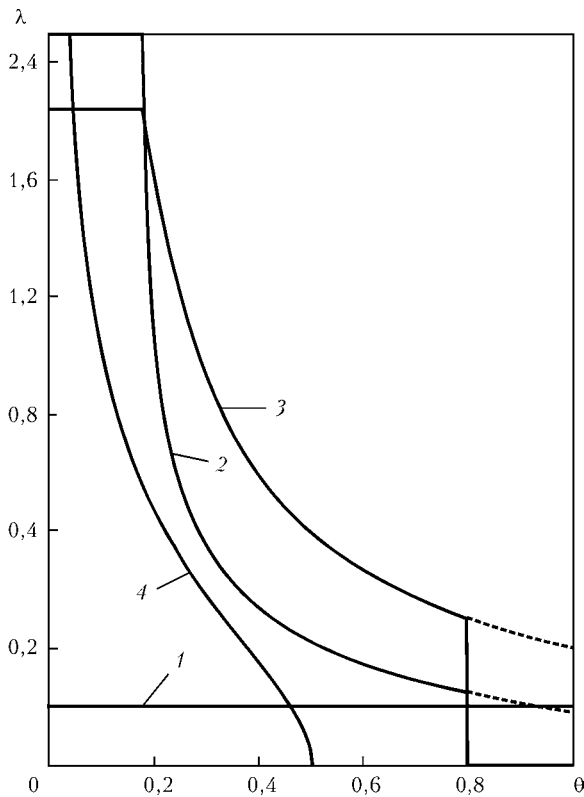


Рис. 2. Предельные зависимости  $\lambda(\theta)$ : 1 —  $\lambda = 0,2$  [2]; 2 —  $\lambda = 0,56\sqrt{\frac{\theta}{(1,1\theta - 0,15)^2 - 1}}$  [3]; 3 —  $\lambda = 0,4/\theta$  [4]; 4 —  $\lambda = 0,5\sqrt{(1 - 2\theta)/\theta}$  [1]

угол охвата поврежденной зоны может быть значительным, вплоть до  $2\pi$ . В этом случае согласно [1] глубина повреждения  $\theta$  не должна превышать 0,5, тогда как в рассматриваемой методике ASME она достигает значения 0,8 (рис. 2, кривая 4). Указанные обстоятельства потребовали проведения теоретических исследований с оценкой указанных факторов. Исследования основаны на методе предельного равновесия для осевых сил и на методе «запредельного» (с учетом геометрической нелинейности) равновесия для окружных сил.

Допустимая зона повреждений в окружном направлении  $\alpha$  (рис. 1) определяется из условия предельного равновесия поврежденного сечения при изгибе и растяжении под действием осевых сил:

$$N = q\pi a^2; M = Nz, \quad (2)$$

где  $z$  — положение центра тяжести сечения,

$$z = \frac{2a\theta}{2\pi - \alpha\theta} \sin \frac{\alpha}{2}. \quad (3)$$

Условие предельного равновесия [5] сводится к уравнению

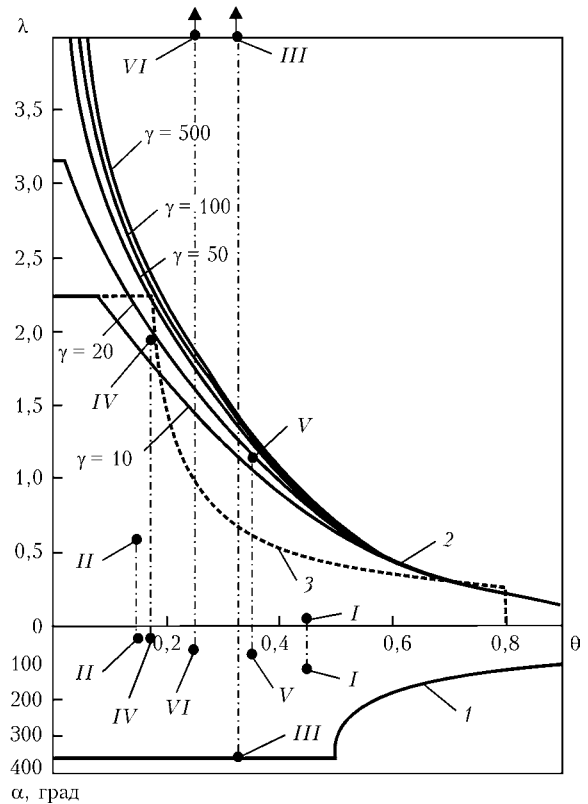


Рис. 3. Диаграмма оценки работоспособности сосудов с повреждением стенки (I–VI — точки, соответствующие параметрам повреждения стенки объекта): I — реактор Р-4А (ОПЗ); II — ресивер аммиака D-4С (ОПЗ); III — трубопровод, линия 9-3 производства аммиака № 1 (ОПЗ); IV — сепаратор С-404 (Укртатнафта); V — ректификационная колонна К-16 (Укртатнафта); VI — холодильник X-401 (Укртатнафта). 1 — допустимый угол повреждения  $[\alpha]$ ; 2 — допустимая длина повреждения  $[\lambda]$ ; 3 — предельная кривая ASME [3] (ОПЗ — Одесский припортовый завод; Укртатнафта — нефтеперерабатывающий завод, г. Кременчуг)

$$\mu = \left\{ 2\sin \left[ \frac{(2\pi - \alpha\theta)(1 - \nu)}{4} \right] - \theta(1 - \nu) \sin \frac{\alpha}{2} \right\} \times \left( 2\cos \frac{\alpha\theta}{4} - \theta \sin \frac{\alpha}{2} \right)^{-1}. \quad (4)$$

Здесь

$$\nu = \frac{N}{N_0}; \mu = \frac{M}{M_0}; N_0 = R_e a S_p (2\pi - \alpha\theta);$$

$$M_0 = 2R_e a^2 S_p \left( 2\cos \frac{\alpha\theta}{4} - \theta \sin \frac{\alpha}{2} \right).$$

Требование равнопредельной нагрузки  $q$  для обечайки как в неповрежденном, так и в поврежденном участке

$$q = q_r = R_e \gamma \quad (7)$$

приводит к зависимости  $\alpha = \alpha(\theta)$ . Решение уравнений (3)–(6) при заданной предельной нагрузке представлено на рис. 3 и в табл. 1.

Поскольку предельное состояние под действием окружных сил может быть достигнуто при тол-



щине стенки, равной расчетному значению, то в поврежденной области можно ожидать развитое пластическое течение, сопровождающееся формоизменением (гидроштамповка). При этом нами принята жесткопластическая диаграмма деформирования материала. Если в качестве модели рассмотреть осесимметричную схему ( $\alpha = 2\pi$ ), что очевидно даст консервативную оценку, то задача сводится к определению предельного состояния бочкообразной конструкции, образующейся при деформировании тонкого участка оболочки (рис. 4). Очевидно, что искривление образующей может привести к повышению несущей способности ослабленного участка, если его длина достаточно мала. Можно показать, что  $2l \leq D$ .

В соответствии с формулой Лапласа и учетом уравнения равновесия получим выражения для меридиональных  $\sigma_1(0)$ ;  $\sigma_1(l)$  и окружных напряжений  $\sigma_2(0)$ ;  $\sigma_2(\lambda)$  в центре и на краю зоны повреждения:

$$\begin{aligned} \sigma_1(0) &= \frac{q(\gamma + V)}{2(1 - \theta)}, \\ \sigma_2(\lambda) &= \frac{q\gamma}{(1 - \theta)} \frac{(2\gamma\lambda^2 - V^2 - \gamma V)(2\gamma\lambda^2 + V^2)}{(2\gamma\lambda^2 - V^2)^2}, \\ \sigma_2(0) &= \frac{q\gamma}{1 - \theta} \frac{(\gamma + V)(2\lambda^2 - V)}{2\gamma\lambda^2 + V^2}, \\ \sigma_1(\lambda) &= \frac{q\gamma}{2(1 - \theta)} \frac{2\gamma\lambda^2 + V^2}{2\gamma\lambda^2 - V^2}, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $V = W_0/S_p$ ,  $W_0$  — стрела прогиба в центре ослабленного участка.

По мере выпучивания окружные напряжения в центральной части остаются неизменными, а меридиональные напряжения возрастают, что соответствует условию пластичности Треска—Сен-Венана. Возможность выпучивания ограничивается условиями прочности по напряжениям  $\sigma_j \leq R_e$

Таблица 1. Зависимости параметров  $\lambda$  и  $\alpha$  от параметра  $\theta$

$\theta$	$\lambda$					$\alpha$ , град
	$\gamma$					
	10	20	50	100	500	
0	2,236	3,162	5,000	7,071	15,81	360
0,1	2,121	2,439	2,772	2,941	3,113	360
0,2	1,647	1,860	2,053	2,128	2,199	360
0,3	1,242	1,370	1,486	1,531	1,573	360
0,4	0,906	0,969	1,027	1,050	1,071	360
0,5	0,637	0,658	0,678	0,685	0,692	360
0,6	0,437	0,437	0,437	0,437	0,437	184
0,7	0,305	0,305	0,305	0,305	0,305	146
0,8	0,218	0,218	0,218	0,218	0,218	122
0,9	0,136	0,136	0,136	0,136	0,136	106

( $\sigma_j$  и  $R_e$  — напряжения и предел текучести материала,  $j = 1, 2$ ). При этом необходимо выполнить условия прочности по деформациям  $\epsilon_{ij} \leq [\epsilon]$ , ( $\epsilon_{ij}$  и  $[\epsilon]$  — интенсивность деформаций и допускаемые деформации [6]).

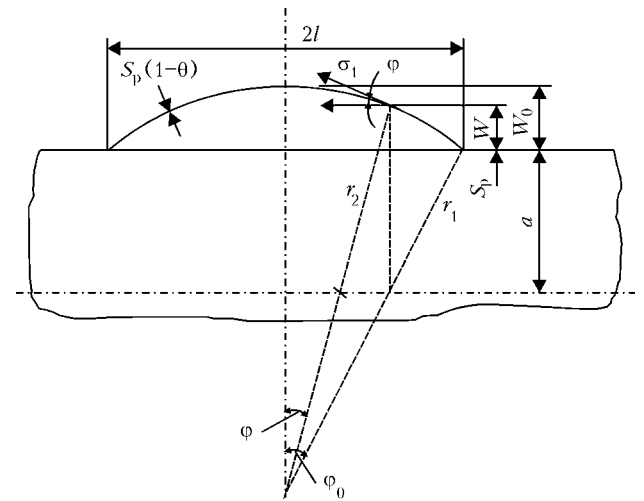


Рис. 4. Выпучивание зоны коррозионного повреждения

Таблица 2. Примеры расчетов конструкций

Номер	Аппарат	Среда	Исходные данные						
			$q$ , МПа	$t$ , °С	$D$ , мм	$h$ , мм	$l$ , мм	$\alpha$ , град	Сталь
1	Реактор Р-4А (ОПЗ)	Аммиак	5,0	350	2600	24,1	17,5	111	12ХМ
2	Ресивер аммиака D-4С (ОПЗ)	Аммиак	2,0	51,7	1524	1,8	75,0	37,6	А516Gr70 (сталь 30)
3	Трубопровод линия 9-3 (ОПЗ)	Конвертированный газ	2,95	265	593	4,0	2125	360	А358 Тр304С11 (03Х18Н11)
4	Сепаратор С-404 (Укртатнафта)	Пропан-бутановая фракция	1,6	20	1600	1,4	215	37,2	Р-3 (16ГС)
5	Колонна К-16 (Укртатнафта)	Углеводородные газы	0,4	150	2200	1,5	125	90	Ст3
6	Холодильник Х-401 (Укртатнафта)	Фракция пентана	3,3	100	500	1,3	390	68,8	Р-3 (16ГС)

Номер	Аппарат	Среда	Вспомогательные параметры				Результаты расчетов		
			$S_p$ , мм	$\gamma$	$\lambda$	$\theta$	$[\alpha]$ , град	$[\lambda]$	$[\theta]$
1	Реактор Р-4А (ОПЗ)	Аммиак	53,8	24,2	0,0468	0,448	360	0,819	0,867
2	Ресивер аммиака D-4С (ОПЗ)	Аммиак	13,0	58,6	0,533	0,138	360	2,49	0,555
3	Трубопровод линия 9-3 (ОПЗ)	Конвертированный газ	12,3	24,1	24,9	0,325	360	1,26	—
4	Сепаратор С-404 (Укртатнафта)	Пропан-бутановая фракция	7,4	108	1,98	0,189	360	2,21	0,224
5	Колонна К-16 (Укртатнафта)	Углеводородные газы	4,3	326	1,14	0,349	360	1,31	0,384
6	Холодильник Х-401 (Укртатнафта)	Фракция пентана	5,7	43,9	7,3	0,228	360	1,883	—

Примечание. Здесь  $q$ ,  $t$ ,  $D$ ,  $h$ ,  $l$ ,  $\alpha$  — внутреннее давление, расчетная температура, внутренний диаметр аппарата; глубина, полудлина и угол охвата зоны повреждения;  $[\alpha]$ ,  $[\lambda]$ ,  $[\theta]$  — допускаемые параметры для зоны повреждения; угол охвата, относительные полудлина и глубина (в скобках указаны отечественные аналоги сталей).

Из условий равнопрочности утоненного участка и основной оболочки  $\sigma_2(0) = q\gamma$  устанавливается связь между параметрами повреждения  $\lambda$ ,  $\theta$  в зависимости от параметра оболочки  $\gamma$  и стрелы прогиба в центре ослабленного участка. В некоторых случаях возможность деформации конструкции регламентируется величиной прогиба  $V$ . По-видимому, приемлемым является значение  $V = 1 \dots 2$ .

Указанная зависимость ограничивает зону допустимых параметров повреждения (рис. 3, табл. 1). Там же показана кривая 3 ASME [3], которая хорошо согласуется с полученными результатами. Совпадение результатов в наибольшей степени наблюдается при малых параметрах  $\gamma$ . При больших значениях получено уточнение в области неглубоких повреждений.

Приведенные на рис. 3 кривые ограничивают область допустимых параметров повреждения и позволяют проводить оценку имеющихся повреждений конструкции, определяемой заданными параметрами повреждения ( $\theta$ ,  $\lambda$ ,  $\alpha$ ). Если вертикальный отрезок, определяемый заданными параметрами повреждения, находится между ограничи-

тельными кривыми  $\lambda = \lambda(\theta)$  и  $\alpha = \alpha(\theta)$ , условие прочности выполняется и ремонт не требуется. В противном случае необходим ремонт.

При этом можно также пользоваться табл. 1.

Примеры расчетов нескольких конструкций приведены в табл. 2. Если условия прочности сосудов 1, 2, 4, 5 выполняются ( $\alpha < [\alpha]$ ,  $\lambda < [\lambda]$ ,  $\theta < [\theta]$ ) — ремонт не требуется. Если условия прочности аппарата (3) и трубопровода (6) не выполнены ( $\lambda > [\lambda]$ ), их необходимо ремонтировать.

- ГОСТ 14249–89. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность.
- ГОСТ 24755–89. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность укрепления отверстий.
- ASME B31G–1991. Инструкция для трубопроводов под давлением. Американский национальный стандарт. Руководство для определения остаточной прочности трубопроводов, подвергшихся коррозии. Американское общество инженеров-механиков.
- Методика оцінки технічного стану труб газопроводу з тривалим строком експлуатації та його залишкового ресурсу. — УкрНДІГаз, 2002.
- Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. — М.: Машиностроение, 1968. — 400 с.
- ДСТУ 4003–2000. Посудини та апарати. Вибір параметрів зміцнювального оброблення.

УкрНИИХиммаш,  
Харьков

Поступила в редакцию  
07.10.2008



## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ТВЕРДОМЕТРИИ ПРИ ОБСЛЕДОВАНИИ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ МЕХАНИЗМОВ

А. В. САДИЛО, В. Г. МАКАЦ, А. С. РАХМАННЫЙ

*Показана возможность применения метода твердометрии для определения механических свойств металла. Получены результаты контроля по каждому основному несущему элементу грузоподъемных механизмов с учетом факта изготовления различных элементов из сталей с разными механическими свойствами.*

*Applicability of hardness measurement method for determination of the metal mechanical properties is demonstrated. Testing results were obtained for each main load-carrying element of hoisting mechanisms allowing for the fact of various elements being made from steels with different mechanical properties.*

Возможность применения метода твердометрии для определения механических свойств металла рассмотрена рядом авторов [1, 2] и регламентирована соответствующей нормативной документацией [3–6] для ряда объектов повышенной опасности, в том числе: объектов атомной энергетики, сосудов, работающих под давлением, котлоагрегатов, трубопроводов, объектов нефтехимии. С начала 1970-х годов метод динамической твердометрии широко применяется при экспертном обследовании — для определения механических свойств металла (предела текучести и временного сопротивления на разрыв) как функции твердости по Бринеллю ( $HB$ ). В силу актуальности этот вопрос часто рассматривается в литературе [7].

При экспертном обследовании грузоподъемных механизмов (ГПМ) этот метод еще не нашел широкого применения, однако целесообразность его применения обоснована необходимостью:

получения информации о механических свойствах металла  $\sigma_T$ ,  $\sigma_B$  основных несущих металлоконструкций при определении возможности дальнейшей эксплуатации, реконструкции, модернизации эксплуатируемых ГПМ; входном контроле импортируемых ГПМ, механические свойства металла которых неизвестны или нуждаются в уточнении;

определения прочности и пригодности к дальнейшей эксплуатации ходовых колес кранов мостового и башенного типа, для которых нормативные значения изложены в работе [8] ( $HB = 320 \dots 390$  МПа) или согласно работе [12] могут быть рассчитаны по формуле:

$$[\sigma_0] = 3,92 HB e^{-HB/800}, \quad (1)$$

где  $[\sigma_0]$  — допустимое значение эффективных напряжений;  $e$  — основание натурального логарифма;

оценки прочности элементов (рельсов) наземных (наземных) подкрановых путей, необходимая

твердость поверхности которых регламентирована нормативными документами [2, 9], может быть рассчитана по формуле:

$$HB_p \geq HB_k \sqrt[9]{\frac{\pi D z}{L}}, \quad (1a)$$

где  $HB_p$ ,  $HB_k$ , МПа — поверхностная твердость рельса и колеса соответственно;  $D$  — диаметр колеса;  $z$  — количество ходовых колес на концевой балке;  $L$  — длина рабочего участка, м.

При проведении экспертного обследования определить твердость  $HB$  поверхности катания практически легче, чем измерить нормированные [10] геометрические браковочные показатели, для определения которых необходимо провести демонтаж колес.

Существующие технологии определения  $\sigma_T$  [ $\sigma_{0,2}$ ] и  $\sigma_B$ , рекомендованные и нормированные [10, 11], имеют определенные недостатки.

### 1. Метод вырезания проб.

1.1. Необходимость проведения вырезки большого количества заготовок, необходимых для изготовления образцов, при этом их количество возрастает с учетом разных напряжений по сечениям; разные марки сталей, использованные для изготовления металлопроката; отсутствие фактических сведений о действительном (не минимально гарантированном) значении  $\sigma_T$  [ $\sigma_{0,2}$ ], которое является основной расчетной величиной. Ориентировочно количество образцов, согласно требованиям [10] по разным типам ГПМ, приведено в табл. 1.

Меньшее количество образцов ведет к получению неполной информации о состоянии металла основных несущих металлоконструкций ГПМ в целом и увеличению возможной погрешности при проведении проверочных расчетов.

1.2. Изменение свойств металла в процессе его резки, механической обработки при изготовлении образцов с целью приведения их в соответствие с требованиями ГОСТ 1497;



**Т а б л и ц а 1. Ориентировочное количество образцов, необходимых для получения достоверных сведений о механических свойствах металла несущих металлоконструкций ГПМ**

Тип крана	Место вырезки согласно работе [10]	Общее количество проб
Мостовой однобалочный	Главная балка — 2 (по центру и место постоянного подъема–опускания груза) Вертикальная ферма (при наличии) — 3 Концевая балка — 2	7
Мостовой двухбалочный с главными балками коробчатого сечения	Главная балка — 4 (по центру и место постоянного подъема–опускания груза) Концевая балка — 2 (по центру, полка, стенка) Тележка грузовая — 1	7
Мостовой двухбалочный ферменной конструкции	Главная балка — 4 (раскосы, пояс) Концевая балка — 2 Тележка грузовая — 1	7
Козловой	Главная балка (ригель) — 5...7 в зависимости от типа Стойки — 4	11

1.3. Возможность ошибки работника (человеческий фактор), проводящего вырезку металла, изготовление образцов, испытание, а также погрешность разрывной машины, невозможность точного определения площадки текучести.

Суммарная погрешность  $\gamma$  при определении  $\sigma_T$  [ $\sigma_{0,2}$ ] этим методом математически не оценивалась в полном объеме, но по оценке работы [12] она достигает 10...12 % (данное значение — ориентировочное, так как невозможно точно определить погрешность, обусловленную п. 1.2. и 1.3.)

2. Метод магнитного контроля (коэрцитометрия) согласно работе [13] позволяет определять остаточный ресурс металла основных несущих металлоконструкций.

Метод не может быть использован для проведения проверочных расчетов, так как не определяет значения  $\sigma_T$  [ $\sigma_{0,2}$ ], необходимые для определения возможности изменения грузоподъемности и других основных параметров, а значение зоны эксплуатации (состояния металла) определялось, исходя из гарантированного значения  $\sigma_T$  [ $\sigma_{0,2}$ ] согласно нормативной документации (например, для стали Ст3  $\sigma_T = 2300 \text{ кг/см}^2$  (230 МПа), хотя по графику (рис. 1) приведенное согласно работе [9] значение  $\sigma_T$  ( $\sigma_{0,2}$ ) достигает  $3300 \text{ кг/см}^2$  (330 МПа).

По экспериментальным данным, полученным авторами при механических испытаниях образ-

цов, вырезанных из 70 ГПМ мостового типа, эксплуатирующихся 20 лет и более, среднее значение составляет 454,0 МПа.

Преимуществами метода твердометрии являются:

- возможность получения результата по каждому основному несущему элементу ГПМ; при этом имеется возможность учитывать факт изготовления различных элементов из сталей с разными (отличными на величину до 20 %) механическими свойствами;

- возможность учета погрешности прибора при обработке результатов измерения нормативными методами.

Преимуществом этого метода является невозможность его использования при отклонении результата  $S/HB > 0,1$ , где  $S$  — среднее квадратичное отклонение следствий испытаний;  $HB$  — среднее арифметическое значение твердости (по Бринеллю).

Согласно работе [6], возможное минимальное среднее значение измеренной твердости будет

$$HB_0 = HB_{cp} - k_c \Delta_{cp} \tag{2}$$

где  $k_c$  — коэффициент, который определяется с помощью распределения Стюдента;  $\Delta_{cp}$  — среднее квадратичное отклонение величины  $HB_{cp}$

$$HB_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n HB_i \tag{3}$$

где  $HB_{cp}$  — среднее значение твердости элемента несущей металлоконструкции ( главная балка, концевая балка, элементы фермы–стойка, раскос, пояс).

3. Практическая легкость подготовки поверхности перед проведением испытаний. Нужно качество поверхности ( $R_a 2,5[R_z 20]$ ) легко достигается с помощью шлифовальной машинки с обычным кругом. При проведении работ авторами были проанализированы возможные причины по-

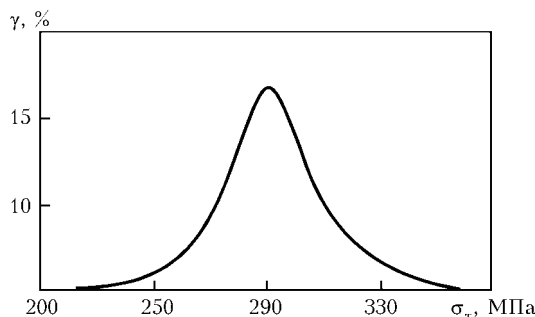


Рис. 1. Распределение значений  $\sigma_T$  ( $\sigma_{0,2}$ ) для стали Ст.3 по результатам экспериментальных испытаний



Таблица 2. Анализ возможных причин возникновения погрешностей при проведении твердомерии

Источник погрешности	Проявление погрешности	Причина	Примечание
Испытанный объект	Повышенный разброс значений твердости	Крупное зерно*	—
		Неплотное прилегание к опоре	—
		Степень и направление клеветы	Устраняется шлифовальной машинкой
		Значительная шершавость поверхности	
		Наличие окалины	
Прибор	Повышенный разброс значений твердости	Низкое качество индентора	Качество индентора, гарантированное изготовителем на определенное количество испытаний
		Отклонение действующей силы от нормали до контролируемой поверхности	Маловероятно в связи с прямолинейностью поверхности проката (кроме трубы)
Наблюдатель	Перекручивание результатов измерений	Настройка прибора	В связи с простотой настройки прибора — маловероятно
		Вибрация прибора	Маловероятно
	Ошибка при отсчете на приборе	Недостаточная подготовка наблюдателя	Маловероятно в связи с простотой настройки прибора

\* Погрешность при измерении твердости по Бринеллю и Роквеллу для крупного зерна —  $M$ , в остальных случаях — не определено.

явления погрешностей согласно табл. 2.12 [14, 15]. Анализ представлен в табл. 2.

Таким образом, вероятность появления основных причин погрешности довольно мала, единственно возможным ее источником может быть непосредственно прибор. Но последние его модификации (например, ТДМ-1(2) производства НПФ «Ультраконсервис») значительно усовершенствованы и обеспечивают разброс значений твердости  $HB$  1...2 %, т. е. допустимый при практическом использовании.

С целью определения практической возможности применения метода твердомерии авторами проведены:

1. Сравнительные испытания результатов, полученных на стационарном твердомере ТШ-2М и приборах ТДМ-2 производства НПФ «Ультраконсервис».

Расхождение между результатами, полученными на стационарном твердомере ТШ-2М и с помощью ТДМ-2, составило, %:

низкоуглеродистая сталь Ст.3 (всех модификаций — сп, псп, кп) — 8;  
низколегированная сталь 09Г2С — 5.

2. Сравнительные испытания для определения  $\sigma_{0,2}[\sigma_T]$  методом твердомерии по схеме:

проведение поэлементной твердомерии приборами ТДМ-2 по схеме рис. 2, а;

определение среднего значения  $HB$  по каждому элементу несущей металлоконструкции;

определение  $\sigma_{0,2}$  по формулам:

$$\sigma_{0,2} = 0,37HB - 240 \text{ при } HB > 1500 \text{ МПа,} \quad (4)$$

$$\sigma_{0,2} = 0,2HB \text{ при } HB < 1500 \text{ МПа,} \quad (5)$$

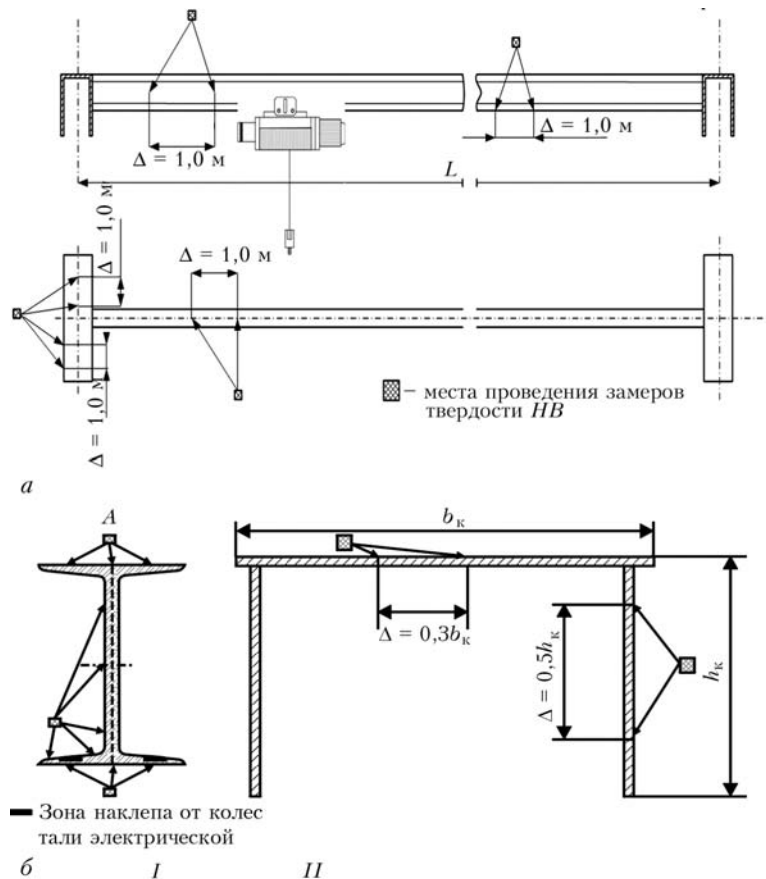


Рис. 2. Схема измерения твердости на мостовом однобалочном кране (а) и по перерезам мостового однобалочного крана (б): I — главная балка (в зоне наклепа измерения не проводились); II — концевая (опорное сечение)

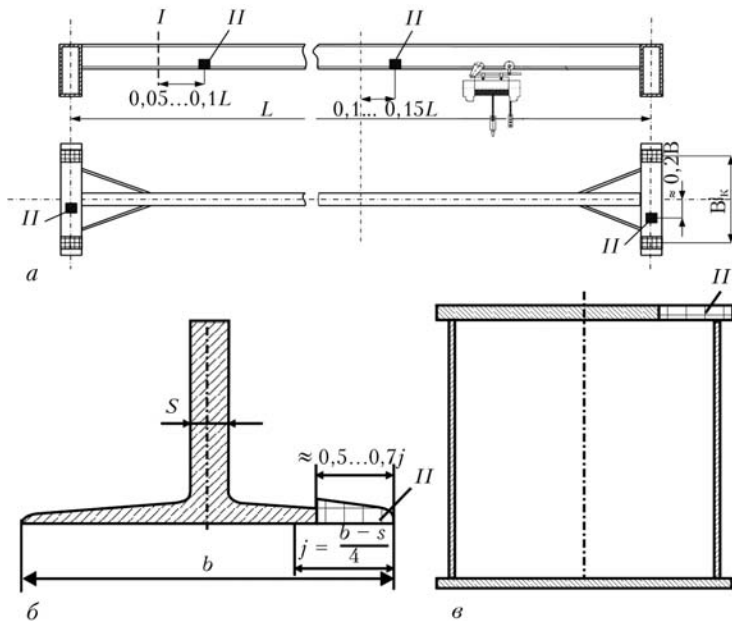


Рис. 3. Место фиксированного подъема–опускания груза (I) и места отбора проб (II) на мостовом кране (а), из главной балки (монорельса) (б) и концевой (в)



Рис. 4. Прибор ТДМ-2

либо по имеющимся справочным таблицам (например, табл. 13 [17], ГОСТ 22761) с последующим переводом  $\sigma_B$  в  $\sigma_{T(0,2)}$ ;

– определение  $\sigma_{0,2}$  классическим способом (вырезка проб), которое было проведено по 70 объектам-кранам мостового типа. Вырезка осуществлена по схемам, приведенным на рис. 2, 3.

При сравнительном анализе результатов испытания образцов на разрывной машине УГ-20 и результатов твердометрии по каждому элементу (главная и концевые балки по каждому ГПМ отдельно) среднее отклонение составило 7,3 % или  $\Delta\sigma_{0,2\text{ ср}} = 14$  МПа.

На взгляд авторов, это расхождение является удовлетворительным и результаты твердометрии могут быть использованы в реальной инженерной практике.

Сейчас авторами готовится и проводится повторный эксперимент с использованием усовершенствованного прибора ТДМ-2 2008 г. выпуска (рис. 4), который включает:

– сравнительные испытания с определением  $\sigma_{0,2}$  как функции твердости *НВ* на основных эле-

ментах, применяемых в конструкциях ГПМ металлопроката (двутавр, швеллер, уголок, труба) указанным выше прибором и стационарным твердомером ТШ-2М;

– повторную твердометрию металлоконструкций кранов, по которым проведено определение  $\sigma_{0,2}$  классическим способом со сравнительным анализом значений  $\sigma_{0,2}$ , полученных ранее на разрывной машине УГ-20 и описанным зависимостями (4), (5).

### Выводы

1. Суммарная погрешность при определении  $\sigma_{0,2}$  методом динамической твердометрии не превышает 10 % результатов, полученных классическим методом согласно требованиям ГОСТ 1497, что делает возможным применение значений, полученных этим методом, в инженерных расчетах при определении возможностей

дальнейшей эксплуатации, а также модернизации и реконструкции ГПМ (с изменением основных параметров). При вычислении  $\sigma_{0,2}$  как функции *НВ* получены меньшие значения, чем классическим способом, и таким образом, определение прочности, полученное с применением динамических твердомеров, идет «в запас».

2. Для окончательного определения возможностей метода твердометрии при определении значения  $\sigma_{0,2}$  необходимо проведение дополнительных испытаний:

– по каждому из основных типов проката отдельно (швеллер, двутавр, уголок, замкнутое трубчатое сечение, листовой прокат);

– на ферменных конструкциях отдельно для растянутых (сжатых) стрелней;

– прочности ходовых колес, элементов (рельсов) подкрановых путей, в том числе при предельных отклонениях их геометрических параметров для определения возможности дальнейшей эксплуатации.

3. Возможности последней версии прибора ТДМ-2 производства ООО «Промприлад» при некоторой его доработке позволяют получить достаточно точный результат, который может быть применен для проведения расчетов при модернизации (реконструкции) ГПМ, а также при проведении расчетно-аналитической процедуры с целью определения возможности их дальнейшей безопасной эксплуатации; входном контроле металлоконструкций импортируемых ГПМ.

4. Наличие отработанного в производстве и эксплуатации парка приборов, низкая трудоемкость, возможность применения методов математической статистики для обработки результатов делает этот метод возможным для легитимизации и применения при:



– проведении расчетов, выполняемых для определения возможности реконструкции (модернизации), в том числе с изменением основных параметров;

– определении возможности дальнейшей безопасной эксплуатации, в том числе в случаях уменьшения толщины прокатных элементов вследствие равномерной коррозии — в соответствии с требованиями [10] и других методических документов;

– определение возможности дальнейшей безопасной эксплуатации колес кранов, элементов (рельсов) подкрановых путей;

– входном контроле импортруемых ГПМ;

– входном контроле металлопроката на предприятиях краностроения и организациях, которые выполняют работы по ремонту и реконструкции ГПМ.

При этом необходима разработка и согласование с надзорными инстанциями соответствующей нормативной документации.

5. Применение твердометрии в комплексе с другими современными методами неразрушающего контроля (в том числе коэрцитометрией [13]) позволяет получить полнообъемную информацию о состоянии металла основных несущих металлоконструкций.

1. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: ИНД-ПРОМ, 1998. — 620 с.
2. ДСТУ 2484–94. Рельсы крановые. Технические требования.
3. Инструкция по экспертному обследованию (техническому диагностированию). Котлы паро- и водогрейные про-

мышленных предприятий / Мин-во пром. политики Украины. — Утв. Приказом № 87 от 09.03.2006 г. — Харьков, 2006.

4. Инструкция по экспертному обследованию (техническому диагностированию). Трубопроводы пары и горячей воды промышленных предприятий / Мин-во пром. политики Украины. — Утв. Приказом № 87 с 09.03.2006 г. — Харьков, 2006.
5. Инструкция по экспертному обследованию (техническому диагностированию). Сосуды, которые работают под давлением на промышленных предприятиях / Мин-во пром. политики Украины. — Утв. Приказом № 87 с 09.03.2006 г. — Харьков, 2006.
6. ДСТУ 4046–2001. Оборудование технологическое нефтеперерабатывающих, нефтехимических и химических производств. Техническое диагностирование. Общие технические требования.
7. Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В. Справочник по сопротивлению материалов. — Киев: Наук. думка, 1988. — 700 с.
8. ГОСТ 28648–90. Колеса крановые. Технические условия.
9. Гайдамака В. Ф. Грузоподъемные машины. — Киев: Вища шк., 1989. — 320 с.
10. ОМД 001.20253.01–2005. Методика проведения экспертного обследования кранов мостового типа.
11. НПАОП 0.00-1.01–07. Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов.
12. Ярошевич В. Д., Рывкина Д. Г. Влияние способа получения проб для механических испытаний на их результаты // Физика металлов и металловедение. — 1958. — № 2.
13. МВ 0.00-7.01–05. Методические указания для проведения магнитного контроля напряженно-деформированного состояния металлоконструкций подъемных сооружений.
14. Должанский П. Р. Контроль надежности металла объектов котлонадзора. Справ. пособие. — М.: Недра, 1985. — 380 с.
15. Неразрушающие методы контроля механических свойств металла энергооборудования в процессе длительной эксплуатации по твердости с использованием современных переносных твердомеров / Э. Я. Векслер, И. В. Замекула, В. Ю. Толстов, Э. В. Семешко // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2008. — № 1. — С. 39–42.

Дорожний експертно-техн. центр ЮЖД, Харьков  
НТУ «ХПИ»

Поступила в редакцию  
02.10.2008

## 15-а Міжнародна науково-технічна конференція ЛЕОТЕСТ-2010

### ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ТА АКУСТИЧНІ МЕТОДИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ МАТЕРІАЛІВ ТА ВИРОБІВ

15–20 лютого 2010 р.

с. Славське

#### Тематика конференції:

- теорія і практика методів неруйнівного контролю матеріалів та виробів;
- діагностичні аспекти застосування методів неруйнівного контролю відповідальних конструкцій в експлуатації;
- електромагнітні та акустичні первинні перетворювачі та методи обробки сигналів, питання метрологічного забезпечення методів НК;
- автоматичні системи та прилади контролю якості виробів;
- науково-організаційні та економічні проблеми, питання акредитації лабораторій, сертифікації продукції, підготовки та атестації персоналу з методів НК.

Тел.: (032) 275-08-69, моб.: 067-9998834 (Учанін Валентин Миколайович).  
E-mail: uchanin@ipm.lviv.ua або leotest@org.lviv.net.





## 17-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ»

С 5 по 9 октября 2009 г. в Ялте проходила 17-я Международная конференция и выставка «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики». Организаторы конференции: УИЦ «НАУКА. ТЕХНИКА. ТЕХНОЛОГИЯ» (г. Киев) и НПП «Машиностроение» (г. Днепропетровск) при поддержке обществ неразрушающего контроля Украины, РФ и Беларуси, а также ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины и Днепропетровского национального университета. Генеральный спонсор — МЧТПП «ОНИКО» (г. Киев).

Информационную поддержку конференции оказали журналы «В мире НК» (С.-Петербург), «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» (Киев), информационный бюллетень УО НКТД «НК информ».

В работе юбилейной конференции приняли участие 250 представителей от Украины, РФ, Германии, Канады, Италии, Казахстана, Беларуси, Литвы, Чешской Республики, Грузии, Молдовы. Из них 184 участника представляли промышленные предприятия, ООО, ЧП; 11 — вузы, 37 — НИИ и КБ, 18 — экспертные и диагностические центры.

Открыл конференцию и первым поздравил ее участников Л. М. Лобанов, академик НАН Украины, заместитель директора ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. Участников конференции поздравили также: от Российского общества НКТД — О. Н. Будадин, службы технадзора Литвы — Й. Шимкунас, Чешского общества НК — В. Макаров, зачитано поздравительное письмо М. Миховски — президента Болгарского общества дефектоскопистов.

О работе УО НКТД в 2009 г. и о планах на 2010 г. рассказал заместитель председателя общества А. В. Мозговой.

На конференцию было представлено 11 пленарных, 77 секционных и 24 стендовых докладов о последних результатах исследований и разработок по широкому спектру проблем НК, диагностирования и прогнозирования остаточного ресурса конструкций; определению физико-механических характеристик материалов, подготовке и сертификации специалистов НК, разработке новых и совершенствованию существующих нормативных документов НК и ТД и других актуальных вопросов.

Впервые в истории украинских конференций по неразрушающему контролю были выделены и рассмотрены проблемы в атомной энергетике и металлургической промышленности.

Для Украины наряду с неразрушающим контролем и технической диагностикой оборудования АЭС, находящегося в эксплуатации, чрезвычайно важным является решение задачи обоснованного продления ресурса, так как в 2010 г. заканчиваются проектные сроки эксплуатации энергоблоков АЭС. Без применения современных высокоинформативных и технологичных методов и средств контроля объективно оценить истинное состояние контролируемых объектов невозможно.

Академик НАН Украины Л. М. Лобанов в своем докладе осветил ход выполнения Целевой комплексной

программы НАН Украины «Проблемы ресурса и безопасности эксплуатации конструкций, сооружений и машин в 2007–2009 гг.». Цель программы — разработка методологических основ прогнозирования остаточного ресурса конструкций, сооружений и механизмов и продление срока эксплуатации техногенно и экологически небезопасных объектов.

С большим вниманием были заслушаны доклады Л. С. Ожигова, В. А. Ананьевского, В. И. Радько (Украина), Н. П. Разыграева, Н. Н. Егорова (Россия) о последних наиболее значительных результатах, достигнутых в направлении НК и ТД оборудования АЭС.

Не менее важными для Украины являются задачи диагностики состояния доменных печей, испытаний материалов и конструкций, гармонизации международных и национальных стандартов, разработки ведомственных нормативных документов.

С докладами, посвященными вопросам разработки современных методов и средств контроля, автоматизации и технической диагностики для оперативного обеспечения норм безопасности по ходу эксплуатации действующих доменных печей; создания положений, регламентов, методик измерения для ведения межведомственных экспертиз и обследований технического состояния, определения ресурса доменных печей; гармонизации стандартов испытаний, перечня параметров и методик сопоставления и выбора огнеупоров, конструкций, проектных решений и подведения итогов на технических стадиях тендеров в доменном производстве выступили А. Я. Ткач, Н. Н. Изюмский, В. А. Стороженько, Г. Я. Безлюдько (Украина), А. В. Петрушко, Д. У. Замосковцев, А. А. Дубов, Э. А. Шепетовский (РФ), А. Садри (Канада), Д. Беттингер (Германия).

Доклад «Ультразвуковой контроль ответственных объектов с использованием современных технологий дальнего действия ультразвукового контроля направленными волнами и фазированных антенных решеток» о внедрении в Украине и странах СНГ технологии дальнего действия ультразвукового контроля протяженных объектов с направленными волнами, разработанной в ходе выполнения Европейского проекта LRUCM и разработке технологии ультразвукового контроля с применением новых сенсоров и систем на линейных фазированных решетках для выявления критически опасных трещин и коррозионного поражения корпусов судов в рамках выполнения Европейского проекта «Ship Inspector» представил проф. В. А. Троицкий, председатель УО НКТД, руководитель отдела неразрушающего контроля ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины.

В рамках конференции состоялся семинар «Об опыте сертификации специалистов НК в соответствии с требованиями международных и национальных стандартов» с участием Украины, РФ, Беларуси, Германии, Словакии, Чехии. Руководителем семинара: Н. Г. Белый, А. Г. Лукьянова (Украина), Г. А. Бигус, Н. П. Бирюкова, А. В. Муллин (РФ). Вместе с представителями авиакосмической отрасли о необходимости введения в



действие стандарта EN 4179-2005 «Аэрокосмическая серия. Квалификация персонала неразрушающего контроля в авиационной промышленности» в Украине, для чего нужно в первую очередь ускорить работу по гармонизации стандарта и создания Национального Совета по неразрушающему контролю в авиакосмической отрасли Украины. По инициативе участников был подписан Протокол о намерении, который может помочь объединению органов по сертификации.

Доклады представителей ведущих органов СНГ по сертификации персонала в области НК были посвящены решению актуальных проблем и вызвали большой интерес у участников конференции. Активное обсуждение основных положений докладов продолжалось и после окончания работы секций.

На конференции были также представлены доклады молодых ученых – студентов, бакалавров, магистров, специалистов, впервые два молодых специалиста были приняты без оплаты за участие благодаря спонсорам.

В рамках конференции состоялись презентации фирм: НПП «Машиностроение» (Днепропетровск), МЧТПП «ОНИКО», Ассоциация «ОКО», НПФ «Ультракон-сервис», НПФ «ПРОМПРИЛАД», НПФ «Диагностические приборы», ООО «Шерл», НПФ «Ультракон», ООО «Карл Цейсс», Национальный авиационный университет (Киев), ООО НПГ «АЛТЭК» (С.-Петербург), Компания «Сперанца» (Желтые воды), Компания «Нординкрафт» (Череповец), НПП «ИНТРОН-СЭТ» (Донецк), ООО «Олимпас», ООО «ДДАП-РАКС» (Днепродзержинск), фирма ATG s.p.o. (Прага), НТК «Солар-1» (Харьков), ЗАО НУЦ «Сварка и контроль» (Москва), ЦСКБ «Прогресс» (Самара), Институт «ВЕМО» (Москва), VZLU, Plc (Prague, Czech Republic),

и др., представивших свои разработки на выставке, проходившей параллельно с конференцией.

Тезисы докладов опубликованы в сборнике материалов конференции (печатный и электронный варианты), ознакомиться с которым можно в секретариате УО НКТД и в УИЦ «НАУКА. ТЕХНИКА. ТЕХНОЛОГИЯ» (тел./факс: (044) 573-30-40, e-mail: office@conference.kiev.ua).

На заседании правления УО НКТД, которое традиционно проводится в рамках конференции, были рассмотрены текущие вопросы, касающиеся работы общества.

По единодушному мнению конференция прошла успешно во всех отношениях. Оргкомитет сделал все возможное для того, чтобы ее участники смогли интенсивно, с пользой для себя поработать, обменяться мнениями, информацией, узнать новое. Конференция имеет свое лицо, в чем-то неповторимое, свои традиции, при этом каждый год в ней что-то меняется.

Благодаря спонсорам участникам впервые была обеспечена возможность ближе и неформально познакомиться до начала работы конференции.

Мы искренне признательны информационным спонсорам за квалифицированную поддержку конференции.

Яркое южное солнце, теплое Черное море и прекрасная крымская природа способствовали плодотворному проведению конференции.

Ждем вас 4–8 октября 2010 г. в Ялте на 18-й конференции!

*З. Ю. Главацкая, А. В. Мозговой*



## ОТКРЫТИЕ МЕМОРИАЛЬНЫХ ДОСОК

28 сентября состоялось торжественное открытие мемориальных досок известным ученым в области технологии сварки и сварочного оборудования, заслуженным деятелям науки и техники Украины, бессменным членам редколлегии журнала «Автоматическая сварка» академикам Национальной академии наук Украины Владимиру Константиновичу Лебедеву и Даниилу Андреевичу Дудко.

На открытии присутствовали многочисленные ученики, коллеги, а также сотрудники Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, родные и

близкие ученые. На митинге выступили академик Б. Е. Патон, академики НАН Украины Н. В. Новиков, И. К. Походня, Б. А. Мовчан. Все выступившие отметили талант ученых, их незаурядные новаторские способности, энергию, заботу о подрастающем поколении, самоотверженность в труде.

Б. Е. Патон высказал пожелание, чтобы соратники, ученики и представители молодого поколения института продолжили славные начинания В. К. Лебедева и Д. А. Дудко и умножили их новыми достижениями.





## ЯКСТЬ — В ІМ'Я КРАЩОГО ЖИТТЯ

12 листопада 2009 р. в 70 країнах світу з ініціативи Європейської організації якості й за підтримки Організації Об'єднаних Націй відзначається Всесвітній день якості під девізом «Якість — в ім'я кращого життя».

Уперше світова громадськість відзначила цей день в 1989 р., а через шість років Європейська організація якості (ЕОQ) оголосила Європейський тиждень якості, присвячений Всесвітньому дню якості.

Мета Всесвітнього дня якості — привернути увагу урядів і громадськості країн світу до проблем якості, сприяти розвитку національних рухів за якість і ділову досконалість, а також їхньої інтеграції у всесвітній рух за якість. І тут мова йде не тільки про безпеку товарів і послуг для людини й навколишнього середовища, не тільки про дотримання норм і стандартів, але у ще більшій мірі мається на увазі задоволеність запитів і очікувань споживачів, поліпшення життя людей на планеті в цілому.

Проблема якості — одна із самих пріоритетних проблем в економіках провідних країн світу. У сучасних умовах якість — це ключ до успіху в діяльності будь-якого підприємства, будь-якої галузі й, звичайно ж, кожної країни. Поняття якості тісно пов'язане з тим, що ми називаємо благами сучасної цивілізації, якістю життя: а це й збереження навколишнього середовища, і фізичне здоров'я, і психологічний комфорт людини.

У ці ж дні своє 20-річчя відзначає Українська асоціація якості (УАЯ), з заснуванням якої пов'язані зародження й розвиток суспільного руху за якість і ділову досконалість на пострадянському просторі. Як основоположник і лідер руху за якість в Україні, а також один з лідерів у країнах Центральної й Східної Європи, УАЯ сприяє розвитку національних рухів за якість і інтеграцію в загальноєвропейський рух за якість, який очолює ЕОQ.

У зв'язку ювілейною датою УАЯ одержала вітання Прем'єр-міністра України Юлії Тимошенко та українських, закордонних і міжнародних організацій, від визнаних авторитетів в сфері якості, у яких дається незалежна професійна оцінка діяльності УАЯ в інтересах України, Європи й усього світу.

10 років пройшло відтоді, коли на Першому Всеукраїнському з'їзді якості з ініціативи УАК була прийнята Українська хартія «За ділову досконалість і якість». І досить важливо для поліпшення життя в Україні, що в переддень Всесвітнього дня якості до Хартії приєдналися авторитетні й шановані в Україні державні й громадські організації: Національна академія наук України, Федерація профспілок, Торгово-промислова палата, Міністерство економіки, Головне керування державної служби, Державний комітет з інформатизації та інші організації. Це надає впевненості, що якість життя в нашій країні буде поліпшуватися.

### Вітання Прем'єр-міністра України Юлії Тимошенко

*Шановні друзі!*

*Щиро вітаю Вас із 20-ю річницею утворення Української асоціації якості — лідера громадського руху за якість і ділову досконалість в Україні!*

*Головний результат Вашої багаторічної діяльності — поступова зміна філософії мислення багатьох лідерів економіки і підприємництва. Вони розуміють важливість якості продукції для її конкурентоздатності та як результат — готові робити інвестиції в поліпшення якості. Кращі менеджери все ширше використовують сучасні принципи лідерства, що має особливе значення для малих і середніх підприємств.*

*Завдяки цілеспрямованій діяльності Асоціації десятки українських організацій та установ, зокрема органи виконавчої влади та місцевого самоврядування, отримали визнання досконалості на європейському рівні. Клуб лідерів якості України, створений Асоціацією, об'єднав кращі компанії нашої держави.*

*Світовий досвід переконує, що безперервне організаційне удосконалення та поліпшення якості є однією з головних умов вирішення соціально-економічних проблем держави. На це спрямована Ваша діяльність, цим Ви здобули визнання не тільки в Україні, але і в світі.*

*У ювілейний рік бажаю Вам нових досягнень та нових одномумців.*

*Хай Вам щастить!*

З повагою  
Прем'єр-міністр України

Юлія ТИМОШЕНКО

10 листопада 2009, м. Київ



## ПОЗДРАВЛЯЕМ С ЮБИЛЕЕМ!

20 сентября 2009 г. заведующему отделом технической диагностики сварных конструкций Института электросварки им. Е.О.Патона НАН Украины доктору технических наук, профессору, заслуженному деятелю науки и техники Украины АНАТОЛИЮ ЯКОВЛЕВИЧУ НЕДОСЕКЕ исполнилось 75 лет.

Анатолий Яковлевич – видный ученый в области оптимизации технологий изготовления и эксплуатации сварных конструкций с учетом требований их прочности, надежности и прогнозирования остаточного ресурса, а также в области разработки нового научно-прикладного направления – технической диагностики сварных конструкций, объектов и сооружений.

В 1953 г. Анатолий Яковлевич закончил с красным дипломом Киевский судостроительный техникум, а в 1958 г. – Киевский политехнический институт. С тех пор уже более 50 лет его научная и практическая деятельность связана с ИЭС им. Е.О.Патона НАН Украины – признанным в мире лидером в области сварки и родственных технологий.

В начале своего трудового пути Анатолий Яковлевич проводил успешные лабораторные и прикладные исследования в области расчета и разработки технологий изготовления уникальных и ответственных в эксплуатации сварных конструкций: был разработан расчетный метод определения остаточных сварочных напряжений и учета их влияния на несущую способность конструкций при продольном изгибе, разработаны эффективные способы снижения остаточных сварочных напряжений, а также ряд новых методов исследования сварочных деформаций и напряжений. На основе этих разработок созданы и внедрены в производство оригинальные устройства и аппаратура.

Сложный производственный комплекс страны, повышение требований по обеспечению безопасности эксплуатации конструкций, объектов и сооружений, решение вопросов экологической безопасности требовали принципиально новых подходов к обеспечению качества, надежности и несущей способности сварных конструкций. По инициативе академика Б.Е.Патона начались работы по обеспечению безопасности эксплуатации конструкций и сооружений. Работы координировались Научным Советом по проблеме "Новые процессы сварки и сварные конструкции", организованным Государственным комитетом СССР по науке и технике в 1963 г. при ИЭС им. Е.О.Патона. В составе секции "Сварные конструкции" Научного Совета начала функционировать рабочая группа № 3 "Техническая диагностика и точность сварных конструкций", которую возглавлял Анатолий Яковлевич. Ему были поручены организация работ и координация разработок ученых различных специальностей в решении этой важной задачи. Так начало развиваться новое научное направление – диагностика технического состояния сварных конструкций в процессе их эксплуатации, оценка их реального остаточного ресурса. В мировой научной и инженерной практике это направление сейчас признано одним из приоритетных направлений, которое генерирует новые масштабные интеллектуальные технологии.

Необходимо отметить глубокие исследования юбиляром процессов деформирования и разрушения материалов и сварных соединений в результате быстрых локальных изменений их структуры, зарождения и развития трещин и др. дефектов, что позволило создать теорию и методы прогнозирования остаточного ресурса и принятия решения о техническом состоянии сварной конструкции. Практическое приложение результатов проведенных работ – разработка и широкое внедрение мониторинговых диагностических и экспертных систем, оборудования и технологий их применения в промышленности.

А. Я. Недосека принимает активное участие в подготовке экспертов, специалистов, инженерных и научных кадров, под его руководством подготовлены и защищены шесть кандидатских диссертаций. Он автор более 170 научных работ и изобретений в области технологии производства и обеспечения безопасности эксплуатации конструкций и сооружений. А. Я. Недосека – заместитель Председателя Технического комитета Украины по стандартизации № 78 "Техническая диагностика и неразрушающий контроль", созданного в 1993 г., заместитель главного редактора журнала "Техническая диагностика и неразрушающий контроль", учрежденного по его инициативе в 1985 г.

Научная и практическая деятельность А. Я. Недосеки отмечена орденом "Дружбы народов" и Государственной премией Украины 2006 г.

*Коллектив Института электросварки им. Е.О.Патона  
НАН Украины, редколлегия и редакция журнала  
«Техническая диагностика и неразрушающий контроль» желают  
Анатолию Яковлевичу доброго здоровья, энергии, оптимизма и  
больших успехов в его сложной и многогранной работе!*



## Программы профессиональной подготовки на 2010 г.

Шифр курса	Наименование программы	Продолжительность	Сроки проведения		
<b>1. Повышение квалификации инженерно-технических работников</b> (с аттестацией на право технического руководства работами при изготовлении ответственных сварных конструкций в т.ч. подведомственных государственным надзорным органам)					
101	Техническое руководство сварочными работами на объектах, за которыми осуществляется государственный надзор	подготовка и аттестация	3 недели (112 ч)	февраль	
102		переаттестация	18 ч	февраль, март, июнь, ноябрь	
103	Техническое руководство сварочно-монтажными работами при строительстве и ремонте газопроводов из полиэтиленовых труб	подготовка и аттестация	2 недели (72 ч)	апрель, октябрь	
104		переаттестация	1 неделя (32 ч)	февраль, май, ноябрь	
105	Подготовка и аттестация председателей комиссий по аттестации сварщиков - экспертов Украинского аттестационного комитета сварщиков (УАКС)		3 недели (112 ч)	декабрь	
106	Аттестация председателей комиссий по аттестации сварщиков - экспертов УАКС (экзамен, расширение области аттестации)		8 ч	по согласованию с заказчиком и УАКС	
108	Подготовка членов комиссий по аттестации сварщиков:	специалистов технологических служб, отвечающих за организацию аттестации сварщиков	2 недели (72 ч)	октябрь	
109		специалистов служб технического контроля, отвечающих за контроль сварных соединений (включая специальную подготовку к аттестации по визуально-оптическому методу контроля)	2 недели (74 ч)	ежеквартально	
110		специалистов служб охраны труда предприятий	2 недели (74 ч)	ноябрь	
111	Аттестация членов комиссий по аттестации сварщиков - специалистов технологических служб по сварке (экзамен, расширение области аттестации)		6 ч	по согласованию с заказчиком	
113	Подтверждение полномочий председателей комиссий - экспертов УАКС:	со стажем 3 года	16 ч	декабрь	
114		со стажем 6 лет	32 ч	июнь, октябрь	
115		со стажем 9 лет	22 ч	май, ноябрь	
170		со стажем 12 лет	20 ч	январь, апрель, июль, сентябрь	
116	Подтверждение полномочий членов комиссий по аттестации сварщиков:	специалистов технологических служб по сварке:	со стажем 3 года	16 ч	март
117			со стажем 6 лет	32 ч	июнь
118			со стажем 9 лет	22 ч	май, ноябрь
171			со стажем 12 лет	20 ч	март, сентябрь
147	специалистов по техническому контролю	специалистов по техническому контролю (включая спец. подготовку к аттестации по визуально-оптическому методу контроля)	8 ч	ежеквартально	
164			37 ч		
119			28 ч		
120			специалистов по охране труда		16 ч
121	Переподготовка специалистов сварочного производства по программам Международного института сварки с присвоением квалификации:	Международный инженер по сварке	438 ч (120 ч')	апрель, ноябрь	
122		Международный технолог по сварке	338 ч (100 ч')		
123		Международный специалист по сварке	227 ч (70 ч')		
124		Международный практик по сварке	140 ч (32 ч')	по мере поступления заявок	
126		Международный инспектор по сварке	полного уровня		227 ч
128	стандартного уровня		166 ч		
125	базового уровня		113 ч		
131	Подготовка менеджеров по управлению качеством в сварочном производстве (с выдачей европейского сертификата)		2 недели (72 ч)	по согласованию с заказчиком	
132	Производство сварочных электродов: организация, технологии и системы управления качеством		3 недели (112 ч)		
133	Техническое руководство сварочными работами при ремонте действующих трубопроводов (под давлением)	аттестация	2 недели (72 ч)		
134		переаттестация	22 ч		
135	Организация неразрушающего контроля на предприятиях железнодорожного транспорта		2 недели (72 ч)	по мере поступления заявок	
136	Металлографические исследования металлов и сварных соединений	аттестация	2 недели (72 ч)	январь	
137		переаттестация	22 ч	май, октябрь	
138	Физико-механические испытания материалов и сварных соединений	повышение квалификации и аттестация	2 недели (72 ч)	июль	
139		переаттестация	20 ч	март, апрель, май	
140	Эмиссионный спектральный анализ (стилюскопирование) металлов и сплавов	аттестация	2 недели (74 ч)	декабрь	
141		переаттестация	22 ч	январь, июль	

142	Ремонт, восстановление и упрочнение изношенных деталей методами наплавки	70 ч	по согласованию с заказчиком
152	Повышение квалификации специалистов по неразрушающему контролю	2 недели (72 ч)	по мере поступления заявок
<b>Тематические семинары (возможно проведение на территории заказчика)</b>			
143	Состояние нормативно-технической документации в области сварочного производства, тенденции и перспективы	1-2 дня	июнь, сентябрь
144	Современное сварочное оборудование на рынке Украины	1 день	ежеквартально
145	Новые технологии профессиональной подготовки сварщиков и дефектоскопистов		
150	Основы сварки и сварочного производства, классификация сварочных и основных материалов для консультантов торговых фирм.	2 дня	по согласованию с заказчиком
151	Современное оборудование и состояние нормативной документации в области сварки труб из термопластов	1-2 дня	
<b>2. Подготовка и повышение квалификации педагогических работников системы профессионально-технического образования в области сварки</b>			
203	Повышение квалификации мастеров производственного обучения по использованию модульных технологий в обучении сварщиков	3 недели (112 ч)	постоянно, по согласованию с заказчиком
204	Повышение квалификации преподавателей профессионального обучения по использованию модульных технологий в обучении сварщиков	2 недели (72 ч)	
205	Повышение квалификации мастеров (инструкторов) производственного обучения по сварке	5 недель (186 ч)	
206	Повышение квалификации преподавателей специальных дисциплин профессионально-технических учебных заведений по направлению «Сварка»	3 недели (112 ч)	
<b>3. Профессиональная подготовка, переподготовка и повышение квалификации персонала в области сварки и родственных технологий (с присвоением квалификации в соответствии с национальными и международными требованиями)</b>			
<b>Курсовая подготовка сварщиков:</b>			
301	ручной дуговой сварки покрытыми электродами	9 недель (352 ч)	постоянно, по согласованию с заказчиком
302	ручной дуговой сварки неплавящимся металлическим электродом в инертных газах (ТИГ)	5 недель (192 ч)	
303	газовой сварки	3 недели (116 ч)	
304	механизированной дуговой сварки плавящимся металлическим электродом в защитных газах (МИГ/МАГ)	3 недели (112 ч)	
305	механизированной дуговой сварки порошковой проволокой	3 недели (112 ч)	
306	автоматической дуговой сварки под флюсом	3 недели (112 ч)	
307	электрошлаковой сварки	3 недели (112 ч)	
308	контактной (прессовой) сварки (рельсов, промышленных и магистральных нефте- и газопроводов)	3 недели (112 ч)	март, ноябрь
309	пластмасс (сварка трубопроводов из полиэтиленовых труб)	5 недель (196 ч)	февраль, июнь, октябрь
310	по программам Международного института сварки с присвоением квалификации Международный сварщик	5–12 недель <sup>2</sup>	по согласованию с заказчиком
315	Специальная подготовка по технологии и оборудованию контактной сварки арматуры	2 недели (72 ч)	
<b>Курсовая переподготовка сварщиков:</b>			
316	ручной дуговой сварки покрытыми электродами	152 / 76 ч <sup>3</sup>	постоянно, по согласованию с заказчиком
318	ручной дуговой сварки неплавящимся металлическим электродом в инертных газах (ТИГ)	76 / 112 ч <sup>3</sup>	
320	газовой сварки	76 ч	
321	механизированной дуговой сварки плавящимся металлическим электродом в защитных газах (МИГ/МАГ)	72 ч	
323	механизированной дуговой сварки порошковой проволокой	76 ч	
325	автоматической дуговой сварки под флюсом	76 ч	
327	электрошлаковой сварки	76 ч	
<b>Повышение квалификации сварщиков:</b>			
330	ручной дуговой сварки покрытыми электродами	2 недели (72 ч)	постоянно, по согласованию с заказчиком
331	ручной дуговой сварки неплавящимся металлическим электродом в инертных газах (ТИГ)	2 недели (72 ч)	
332	газовой сварки	2 недели (72 ч)	
333	механизированной дуговой сварки плавящимся металлическим электродом в защитных газах (МИГ/МАГ)	2 недели (72 ч)	
334	механизированной дуговой сварки порошковой проволокой	2 недели (72 ч)	
335	автоматической дуговой сварки под флюсом	2 недели (72 ч)	
336	электрошлаковой сварки	2 недели (72 ч)	
339	Повышение квалификации газосварщиков (газовая пайка цветных металлов)	2 недели (72 ч)	

Курсовая подготовка дефектоскопистов:

340	ультразвукового контроля		196 ч	по согласованию с заказчиком	
341	рентгеновского и гамма контроля		188 ч		
342	магнитного контроля		180 ч		
343	контролеров неразрушающего контроля		160 ч		
<b>Целевая курсовая подготовка дефектоскопистов для железнодорожного транспорта:</b>					
352	магнитного контроля		120 ч	по согласованию с заказчиком	
355	ультразвукового контроля		160 ч		
358	Специальная подготовка и аттестация согласно РД 07-09-97		76 ч		
<b>Другие профессии</b>					
367	Подготовка газорезчиков	газовой резки	3 недели (112 ч)	постоянно, по согласованию с заказчиком	
368		ручной и механизированной воздушно-плазменной резки	3 недели (112 ч)		
369	Подготовка металлизаторов по нанесению упрочняющих и защитных покрытий на металлы	электродуговым напылением	3 недели (112 ч)		
370		газопламенным напылением	3 недели (112 ч)		
371		детонационным напылением	3 недели (112 ч)		
372		плазменным напылением	3 недели (112 ч)		
373	Переподготовка по профессии «Плавильщик металлов»		2 недели (72 ч)		
<b>4. Аттестация персонала сварочного производства</b>					
401	Специальная подготовка и аттестация сварщиков в соответствии с ДСТУ 2944-94, ДСТУ 2945-94, правилами Госгорпромнадзор (НПАОП 0.00-1.16-96), правилами Госатомнадзора (ПНАЭГ-7-003-87)		152 ч <sup>4</sup>	постоянно, по согласованию с заказчиком	
402			72 ч <sup>4</sup>		
403	Дополнительная и внеочередная аттестация сварщиков согласно НПАОП 0.00-1.16-96		24 ч		
404	Периодическая аттестация сварщиков в соответствии с правилами Госгорпромнадзор (НПАОП 0.00-1.16-96), правилами Госатомнадзора (ПНАЭГ-7-003-87)		32 ч		
405	Специальная подготовка и аттестация сварщиков в соответствии с международными (или европейскими) стандартами ISO 9606 (или EN 287-1)		3 недели (112 ч)		
406			2 недели (72 ч)		
407	Периодическая аттестация сварщиков в соответствии с международными (или европейскими) стандартами ISO 9606 (или EN 287-1)		32 ч		
408	Специальная подготовка и аттестация операторов автоматических установок дуговой сварки плавлением / наладчиков контактной сварки в соответствии с стандартом ДСТУ ISO 14732		2 недели (72 ч)		
409	Специальная подготовка и аттестация сварщиков на право выполнения работ при ремонте действующих магистральных трубопроводов (под давлением)		3 недели (112 ч)		
410	Периодическая аттестация сварщиков на право выполнения работ при ремонте действующих магистральных трубопроводов (под давлением)		32 ч		
413	Аттестация сварщиков пластмасс (сварка трубопроводов из полиэтиленовых труб)		проводится по окончании курса 309		
414	Периодическая аттестация сварщиков пластмасс (сварка трубопроводов из полиэтиленовых труб)		32 ч	январь, март, апрель, июнь, сентябрь, декабрь	
415	Специальная подготовка дефектоскопистов к сертификации согласно НПАОП 0.00-6.14-97	ультразвуковой контроль	24 ч <sup>5</sup>	ежемесячно	
416			60 / 70 / 140 ч <sup>5</sup>	по согласованию с заказчиком	
419		радиационный контроль	24 ч <sup>5</sup>	ежемесячно	
420			60 / 70 / 140 ч <sup>5</sup>	по согласованию с заказчиком	
423			магнитный контроль		24 / 60 / 110 ч <sup>5</sup>
426			капиллярный контроль		24 / 60 / 110 ч <sup>5</sup>
428			визуально-оптический контроль	24 / 30 / 70 ч <sup>5</sup>	ежемесячно
430	Специальная подготовка и перееаттестация дефектоскопистов по комплексному ультразвуковому контролю колесных пар вагонов		36 ч	по согласованию с заказчиком	
431	Специальная подготовка и перееаттестация дефектоскопистов 2-го и 3-го разрядов по комплексному ультразвуковому контролю колесных пар вагонов		160 ч		
433	Специальная подготовка и аттестация специалистов по контролю качества защитных покрытий	аттестация	2 недели (72 ч)		
434		перееаттестация	32 ч		
	Профессиональное тестирование сварщиков дуговой сварки		4-8 ч	постоянно	

<sup>1</sup> - Обучение по короткой программе (для специалистов сварочного производства со стажем работы на соответствующей должности не менее 3-х лет).

<sup>2</sup> - Продолжительность обучения зависит от специализации и требуемого уровня квалификации.

<sup>3</sup> - Длительность программы определяется по результатам входного тестирования.

<sup>4</sup> - Продолжительность подготовки устанавливается аттестационной комиссией.

<sup>5</sup> - Продолжительность обучения указывается в направлении ОСП (орган по сертификации персонала).

По просьбе заказчиков возможно проведение обучения по другим программам, не вошедшим в данный перечень. На период обучения слушателям предоставляется жилье с оплатой за наличный расчет. Стоимость обучения определяется при заключении договора. Для приема на обучение необходимо направить заявку с указанием шифра курса, количества специалистов и почтовых реквизитов предприятия.

Украина, 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11 Тел. (44) 456-63-30, 456-10-74, 200-82-80, 200-81-09, Факс (44) 456-48-94; E-mail: paton\_muac@ukr.net, http: www.paton-tc.kiev.ua

## ПОДПИСКА — 2009 на журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»

Стоимость подписки через редакцию*	Украина		Россия		Страны дальнего зарубежья	
	на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
		160 грн.	320 грн.	700 руб.	1400 руб.	26 дол. США
*В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.						

Если Вас заинтересовало наше предложение по оформлению подписки непосредственно через редакцию, заполните, пожалуйста, купон и отправьте заявку по факсу или электронной почте. **Контактные телефоны: (38044) 271-26-23; 529-26-23; факс: (38044) 528-34-84, 529-26-23.**

Подписку на журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» можно также оформить по каталогам подписных агентств «Пресса», «Идея», «Саммит», «Прессцентр», KSS, «Блицинформ», «Меркурий» (Украина) и «Роспечать», «Пресса России» (Россия).

<b>ПОДПИСНОЙ КУПОН</b>		
Адрес для доставки журнала _____		
Срок подписки с _____	<b>200 г. по</b>	<b>200 г. включительно</b>
Ф. И. О. _____		
Компания _____		
Должность _____		
Тел., факс, E-mail _____		



## РЕКЛАМА в журнале «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»

### Обложка наружная, полноцветная

Первая страница обложки (190×190мм) — 700\$  
 Вторая страница обложки (200×290мм) — 550\$  
 Третья страница обложки (200×290мм) — 500\$  
 Четвертая страница обложки (200×290мм) — 600\$

### Обложка внутренняя, полноцветная

Первая страница обложки (200×290мм) — 400\$  
 Вторая страница обложки (200×290мм) — 400\$  
 Третья страница обложки (200×290мм) — 400\$  
 Четвертая страница обложки (200×290мм) — 400\$

### Внутренняя вставка

Полноцветная (разворот А3) (400×290мм) — 570\$  
 Полноцветная (200×290мм) — 340\$  
 Полноцветная (200×142мм) — 170\$  
 Реклама в разделе информации  
 Полноцветная (165×245мм) — 300\$  
 Полноцветная (165×120мм) — 170\$  
 Полноцветная (82×120мм) — 80\$  
 • Оплата в гривнях или рублях РФ по официальному курсу  
 • Для организаций-резидентов Украины цена с НДС и налогом на рекламу  
 • Статья на правах рекламы — 50% стоимости рекламной площади  
 • При заключении рекламных контактов на сумму, превышающую 1000\$, предусмотрена гибкая система скидок

### Технические требования к рекламным материалам

- Размер журнала после обрезки 200×290мм
- В рекламных макетах, для текста, логотипов и других элементов необходимо отступать от края модуля на 5мм с целью избежания потери части информации
- Все файлы в формате IBM PC**
- Corell Draw, версия до 10.0
- Adobe Photoshop, версия до 7.0
- QuarkXPress, версия до 7.0
- Изображения в формате TIFF, цветовая модель CMYK, разрешение 300 dpi
- К файлам должна прилагаться распечатка (макеты в формате Word не принимаются)

Подписано к печати 14.12.2009. Формат 60584/8. Офсетная печать.  
 Усл. печ. л. 9,04. Усл.-отг. 9,6. Уч.-изд. л. 9,2+4 цв. вклейки.  
 Цена договорная. Печать ООО «Фирма «Эссе».  
 03142, г. Киев, просп. Акад. Вернадского, 34/1.