

Учредители: Национальная академия наук Украины
Институт электросварки им. Е.О.Патона
Международная ассоциация «Сварка»

Издатель: 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, В. Л. Венгринович,
Э. Ф. Гарф, А. А. Грузд,
Е. А. Давыдов, А. Т. Зельниченко,
М. Л. Казакевич, О. М. Карпаш,
В. В. Ключев, А. А. Лебедев,
Л. М. Лобанов, З. Т. Назарчук,
Н. В. Новиков, Ю. Н. Посыпайко,
Г. И. Проколенко, В. А. Стороженко,
В. А. Стрижало, В. Н. Учанин,
С. К. Фомичев, Н. Г. Чаусов,
Е. В. Шаповалов, В. Е. Щербинин

Адрес редакции

03680, Украина, г. Киев-150,
ул.Боженко, 11
Институт электросварки им.Е.О.Патона
НАН Украины
Тел.: (044) 205-23-90
Факс: (044) 200-54-84, 200-82-77
E-mail: journal@paton.kiev.ua
URL: www.rucont.ru

Научные редакторы

Н. Г. Белый, А. А. Грузд

Редактор

Т. В. Юштина

Электронная верстка

Л. Н. Герасименко, Д. И. Середа

Свидетельство
о государственной регистрации
КВ4787 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.

Журнал «Техническая диагностика
и неразрушающий контроль» переиздается
в полном объеме на английском языке
под названием «*Technical Diagnostics
and Non-Destructive Testing*»
издательством «Cambridge International
Science Publishing», Великобритания

СОДЕРЖАНИЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

- Недосека А. Я., Овсиенко М. А., Харченко Л. Ф., Яременко М. А.* Особенности распространения АЭ сигналов при различных граничных средах..... 3
- Найда С. А.* Пьезопреобразователи для ультразвуковых уровнемеров..... 9
- Скальський В. Р., Станкевич О. М., Басараб Р. М.* Діагностування обладнання нафтопомпувальних станцій методом акустичної емісії..... 14
- Маєвський С. М., Серий К. М.,* Безконтактна система визначення координат вимірювального перетворювача дефектоскопа 20
- Безымянный Ю. Г., Галаненко Д. В., Тесленко Л. О.* Особенности контроля АЭ при высокоскоростном циклическом консольном изгибе образцов..... 24
- Шаповалов Е. В.* Применение интеллектуальных систем технического зрения для идентификации объектов на фоне помех..... 33
- Выскребцов В. Б., Шульженко А. В., Гребенников В. Н., Манорик П. А.* Математическая модель процесса закупорки сквозных дефектов изделий при контакте с технологическими растворами перед испытаниями на герметичность 38
- Ишин Н. Н., Гоман А. М., Скороходов А. С., Гаврилов С. А.* Диагностика технического состояния приводных зубчатых механизмов на основе анализа ударных процессов в зубчатых передачах 43
- Прядко Н. С.* Акустико-эмиссионный мониторинг процесса струйного измельчения 46
- Рудаевський Д. В.* Поширення поверхневої тріщини в стінці труби нафтопроводу з урахуванням її наводнювання..... 53

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

- Долинский В. М., Стогний В. Н., Черемская В. И.* Оценка несущей способности сосудов с вмятинами 56

ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ

- Новые книги..... 59
- Портативная рентгенотелевизионная система..... 61
- Новая система ультразвукового контроля для определения коррозионного износа трубопроводов «Универсал-1П» 62

ИЗДАНИЕ ПОДДЕРЖИВАЮТ:

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

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, V. L. Vengrinovich,
E. F. Garf, A. A. Gruzd,
E. A. Davydov, A. T. Zelnichenko,
M. L. Kazakevich, O. M. Karpash,
V. V. Klyuev, A. A. Lebedev,
L. M. Lobanov, Z. T. Nazarchuk,
N. V. Novikov, Yu. N. Posypayko,
G. I. Prokopenko, V. A. Storozhenko,
V. A. Strizhalo, V. N. Uchanin,
S. K. Fomichev, N. G. Chausov,
E. V. Shapovalov, V. E. Shcherbinin

Address

The E. O. Paton Electric
Welding Institute
of the NAS of Ukraine,
11 Bozhenko str.,
03680, Kyiv, Ukraine
Tel.: (044) 200-23-90,
Fax: (044) 200-54-84, 200-82-77
E-mail: journal@paton.kiev.ua
URL: www.rucont.ru

Scientific editors

N. G. Bely, A. A. Gruzd

Editors

T. V. Ushtina

Electron galley

L. N. Gerasimenko, D. I. Sereda

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

«*Tekhnicheskaya diagnostika
i nerazrushayushchiy kontrol*»

journal is republished cover-to-cover in English
under the title of «*Technical Diagnostics
and Non-Destructive Testing*» by Cambridge
International Science Publishing, UK

CONTENT

SCIENTIFIC-TECHNICAL

- Nedoseka A.Ya., Ovsienko M.A., Kharchenko L.F.,
Yaremenko M.A.* Features of propagation of AE signal
in different boundary media 3
- Naida S.A.* Piezoelectric transducers of ultrasonic level meters 9
- Skalskii V.R., Stankevich O.M., Besarab R.M.*
Diagnostics of oil pumping station equipment by acoustic
emission method 14
- Maevskii S.M., Serii K.M.* Contactless system for determination of
coordinates of flaw detector measuring transducer 20
- Bezimyannii Yu.G., Galanenko D.V., Teslenko L.O.* Features of
AE monitoring at high-speed cyclic cantilever bending of samples 24
- Shapovalov E.V.* Application of intelligent systems of computer
vision for object identification against noise background 33
- Vyskrebtsov V.B., Shulzhenko A.V., Grebennikov V.N.,
Manorik P.A.* Mathematical model of the process of plugging
of through-thickness defects at contact with process solutions
before leak testing 38
- Ishin N.N., Goman A.M., Skorokhodov A.S., Gavrilov S.A.*
Diagnostics of technical condition of driven wheelwork based on
analysis of shock processes in gears 43
- Pryadko N.S.* Acoustic emission monitoring of the process
of jet refinement 46
- Rudavskii D.V.* Propagation of a surface crack in the wall of an oil
pipe, allowing for its hydrogenation 53

INDUSTRIAL

- Dolinskii V.M., Stognii V.N., Cheremskaya V.I.* Assessment of
load-carrying capacity of vessels with dents 56

NEWS AND INFORMATION

- New books 59
- Portable X-Ray TV system 61
- New Ultrasonic Testing System for Determination of Corrosion
Wear of Pipelines «Universal – 1P» 62

JOURNAL PUBLICATION IS SUPPORTED BY:

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

Ukrainian Society for Non-Destructive Testing and Technical Diagnostic



УДК 620.15.50

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АЭ СИГНАЛОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ГРАНИЧНЫХ СРЕДАХ

А. Я. НЕДОСЕКА, д-р техн. наук, **М. А. ОВСИЕНКО**, **Л. Ф. ХАРЧЕНКО**, инженеры, **М. А. ЯРЕМЕНКО**, канд. техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Исследованы особенности распространения УЗ волн в пластинах, находящихся в воде, а также с их частичным погружением. Предложены конструкция преобразователей и средства их крепления. Исследовано влияние температуры и солености воды на параметры сигналов АЭ и точность локации сигналов АЭ.

Features of ultrasonic wave propagation in plates located in water and also those partially immersed into water were studied. Designs of transducers and means of their fastening are proposed. Influence of water temperature and salinity on AE signal parameters and accuracy of AE signal location were studied.

Распространение сигналов АЭ в материалах конструкций под водой или на границе воздух–вода имеет свои особенности, связанные с отводом значительной части энергии АЭ сигналов непосредственно в воду. Поэтому задача создания средств и методик диагностирования сварных трубопроводов, в частности, теплосетей, отдельных элементов строительных конструкций (опоры мостов и др.), работающих под водой, в условиях заболоченности, наличия грунтовых, дождевых или сливных вод становится достаточно актуальной. Анализ исследований, полученных при контроле таких конструкций, показал, что данная проблема стоит особенно остро на предприятиях городских тепло- и водосетей. В настоящее время разработаны методические рекомендации по техническому диагностированию трубопроводов тепловых сетей с использованием акустического метода [1], данной проблеме посвящено ряд публикаций, например, [2, 3]. В то же время остается еще много нерешенных или требующих более глубокого изучения задач, таких как:

- исследование особенностей законов распространения сигналов АЭ в трубо-оболочечных конструкциях и пластинах;
- исследование факторов, влияющих на особенности регистрации сигналов АЭ;
- разработка датчиков АЭ, способных работать в условиях высокой влажности, в воде, мокрых грунтах;
- разработка отдельных блоков и узлов аппаратуры для решения поставленных задач;
- адаптация программного обеспечения, позволяющего в реальном времени проводить обработку и оценку полученной информации;
- разработка методики выполнения измерений и алгоритмов обработки результатов измерений и принятия решений.

Настоящая статья посвящена рассмотрению некоторых из перечисленных задач, а именно:

- исследованию особенностей распространения УЗ волн в пластинах, находящихся в воде, а также с их частичным погружением. При этом источник сигналов АЭ находился в воде, над водой;
- конструированию преобразователей и средств их крепления в указанных условиях;
- исследованию влияния температуры и солености воды на параметры сигналов АЭ;
- исследованию точности локации сигналов АЭ и др.

Исследования проводили с использованием системы АЭ контроля и диагностирования ЕМА-4, состоящей из прибора (рис. 1), управляющего компьютера (ноутбука), датчиков со встроенными преусилителями и кабелями.

Основные характеристики четырехканальной системы ЕМА-4 следующие: измерение всех стандартных параметров АЭ; отображение полной формы импульса АЭ; спектральный анализ импульса АЭ; корреляция между сигналами АЭ; линейные и логарифмические режимы усиления; тестовые режимы каналов АЭ; аналоговые входные линии технологических параметров; цифровые входы и вы-



Рис. 1. Акустико-эмиссионный прибор ЕМА-4

© А. Я. Недосека, М. А. Овсиенко, Л. Ф. Харченко, М. А. Яременко, 2012



ходы для управления технологическими процессами; питание 12В/0,3 А; возможность питания через интерфейс USB; размеры 119×113×35 мм; масса 0,32 кг.

Прибор ЕМА-4 имеет автоматическую установку фиксированных/плавающих порогов; возможность упорядочивания импульсов, принятых разными каналами, по времени поступления каждого; детектирование разрыва и короткого замыкания в цепи внешнего предварительного усилителя; цифровые фильтры; функцию корреляции между каналами АЭ; режим осциллографа; спектральный анализ импульсов АЭ.

Программное обеспечение системы осуществляет подготовку и проведение измерений, обработку результатов, а также позволяет проводить автоматическое измерение локальных скоростей звука, графическую обработку результатов измерения, графическое изображение карты локации (плоскость, сфера, трубопроводы), контроль качества установки датчиков, расчет производных от АЭ параметров, формирование критериев для фильтрации импульсов и событий АЭ, для выдачи сигнала тревоги (в режиме испытания) [4].

Для проведения исследований разработана структурная схема эксперимента (рис. 2), позволяющая изучать влияние граничной среды на параметры регистрируемых АЭ-сигналов.

Большое внимание уделено совершенствованию конструкции приемного преобразователя, наполнению датчика акустопоглощающим материалом с целью уменьшения времени реверберации (послезвучания сигнала) и улучшению параметров принимаемого сигнала.

Для проведения АЭ контроля объектов, погруженных в водную среду, разработаны средства герметизации датчика и соединительных кабелей, а также изучено их влияние на надежную работу системы. В качестве наполнителя-герметизатора применяли эпоксидную смолу ЭД-20 с различными добавками и поглощающие слои из материалов с чередующейся плотностью, что позволило сместить механический резонанс датчика в область низких частот, вынести его из области рабочих частот (100...400 кГц) и уменьшить время реверберации акустического сигнала.

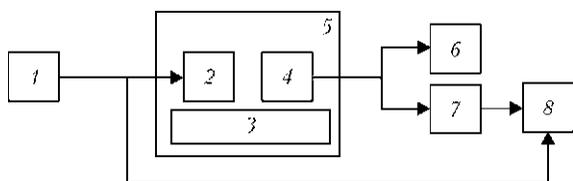


Рис. 2. Схема для определения влияния граничной среды при прохождении акустического сигнала вдоль металлической пластины: 1 — генератор импульсов; 2 — датчик-излучатель; 3 — металлическая пластина; 4 — датчик-приемник; 5 — емкость; 6 — система ЕМА-4; 7 — промежуточный усилитель; 8 — двухлучевой осциллограф

При проведении исследований использовали пластину размером 500×80×6 мм из стали Ст3. Исследовали такие варианты граничных сред:

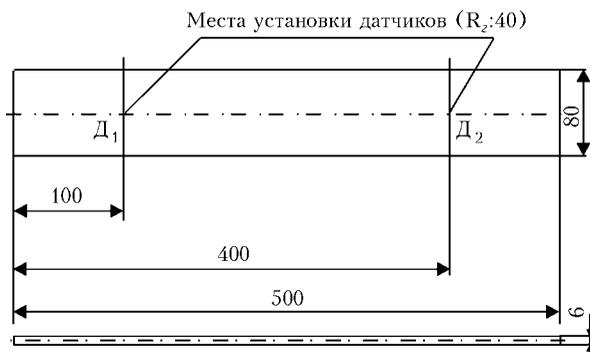


Рис. 3. Схема установки датчиков АЭ (Д1 и Д2) на металлической пластине

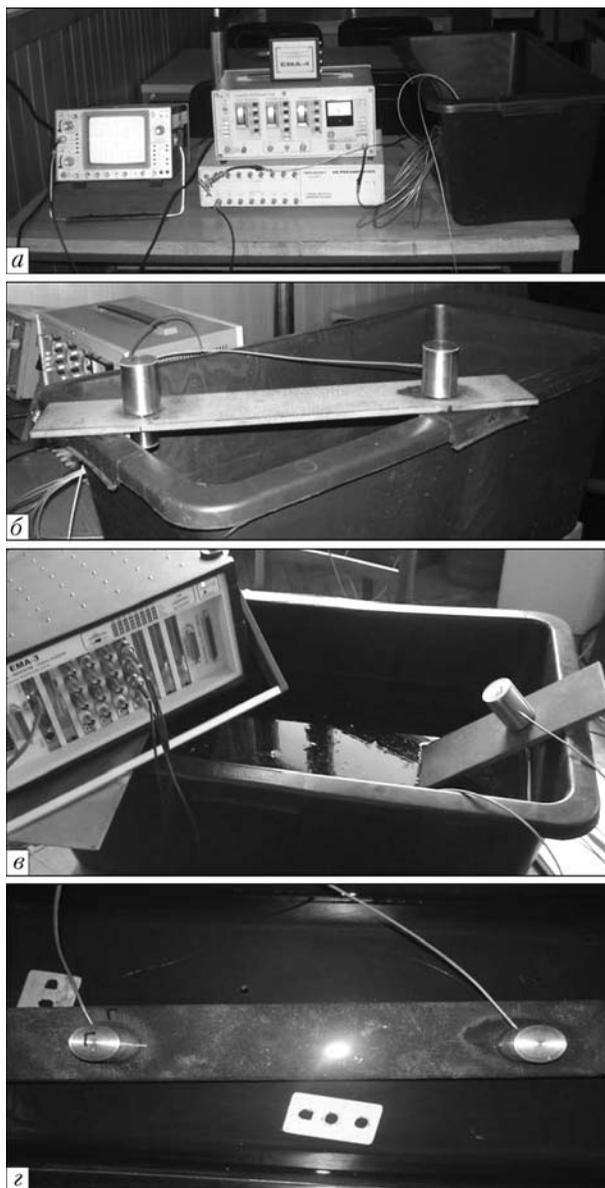


Рис. 4. Этапы проведения изучения прохождения АЭ сигнала при различных граничных средах: а — приборы для проведения исследований; б — граничная среда воздух–металл–воздух; в — граничная среда воздух–металл–вода; г — граничная среда вода–металл–вода



воздух–металл–воздух; воздух–металл–вода; вода–металл–воздух; вода–металл–вода.

Места установки датчиков на пластине показаны на рис. 3.

Оборудование для проведения исследования и этапы его проведения представлены на рис. 4.

Во время проведения исследований температура окружающего воздуха составляла 20 °С, температура воды 15 °С.

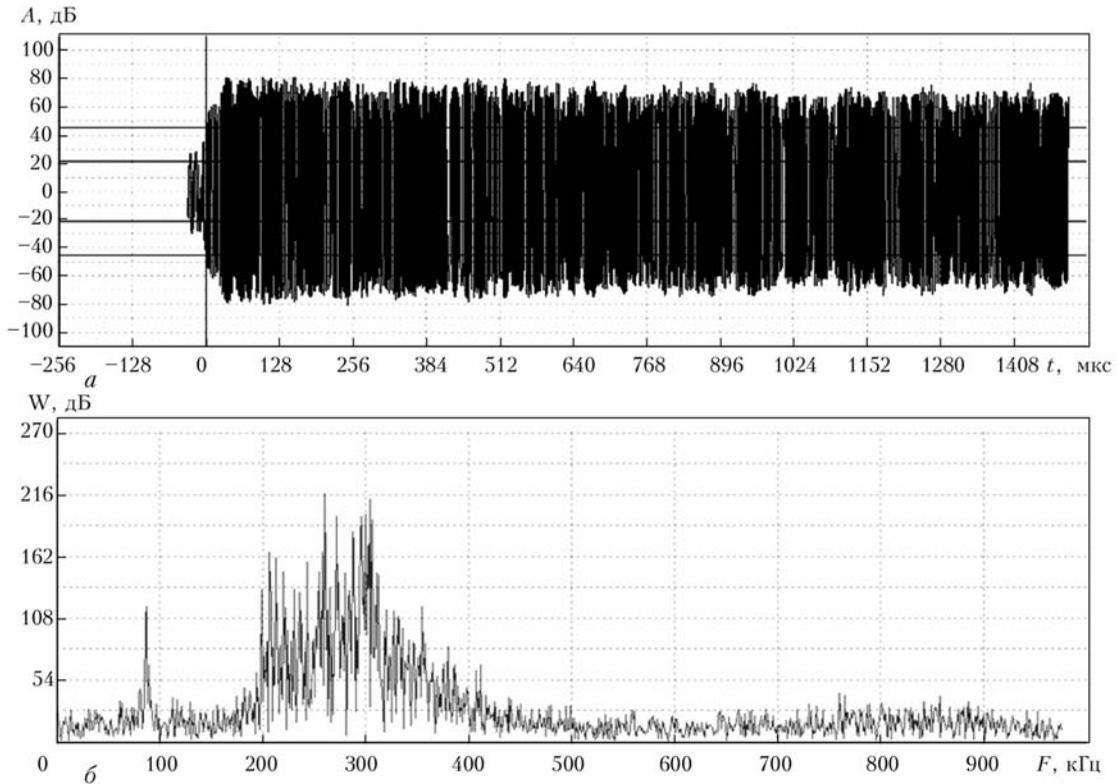


Рис. 5. Отклик на сигнал АЭ при использовании гидродатчика без наполнителя (граничная среда воздух–металл–воздух): а — осциллограмма; б — спектральная характеристика

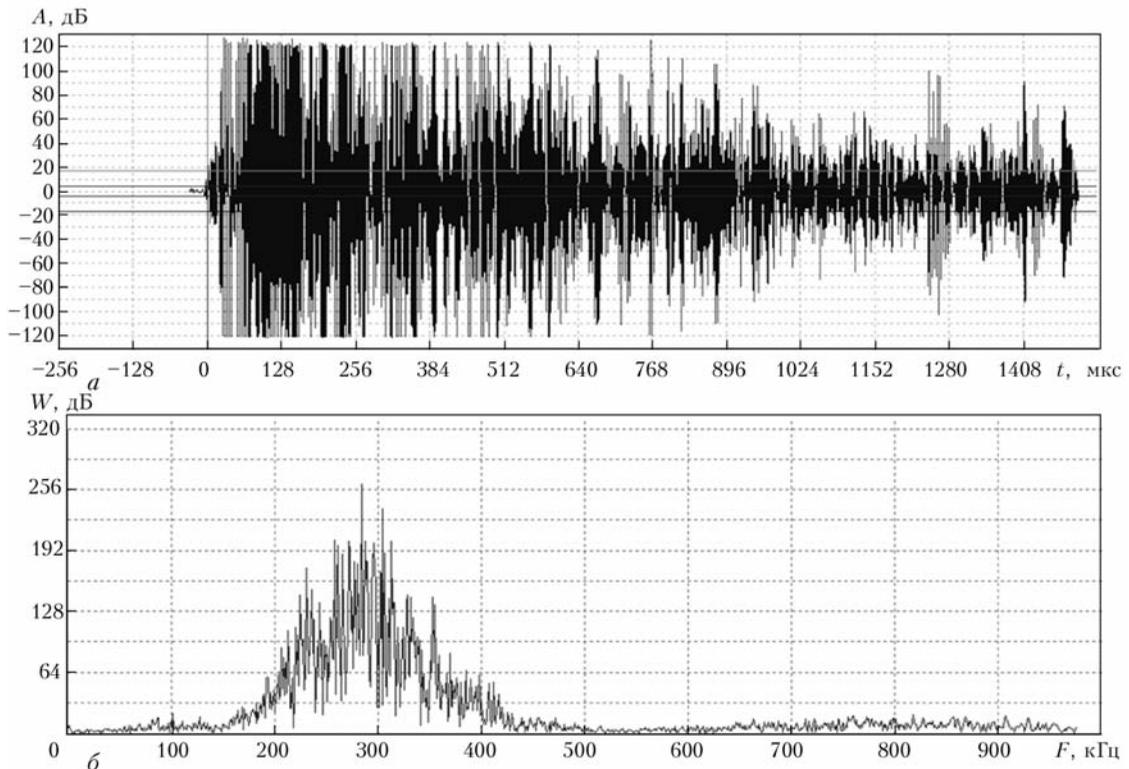


Рис. 6. Отклик датчика на сигнал АЭ при использовании гидродатчика с наполнителем (граничная среда воздух–металл–воздух): а — осциллограмма; б — спектральная характеристика



Первоначально проанализировали параметры сигналов АЭ при граничной среде воздух–металл–воздух и использовании различных видов датчиков: обычный ДАЭ-150; в защитном корпусе; без дополнительного демпфирования и при его наличии с целью последующего сравнения данных, полученных при разных условиях проведения экспериментов.

Для получения спектральной и амплитудно-частотной характеристик сигналов АЭ с генератора на датчик подавались сигналы амплитудой $A = 400$ мВ и длительностью $T = 2$ мкс. Использовали линейный режим усиления $K_{yc} = 40$ дБ. Контролируемый датчик подключался к 1-му каналу прибора ЕМА-4.

Граничная среда воздух–металл–воздух (источник сигналов АЭ и приемник находятся на воздухе). Отклики датчика на сигнал АЭ представлены на рис. 5, 6.

Граничная среда воздух–металл–вода.

1. Источник сигналов АЭ находится в воде, приемник (гидродатчик с наполнителем) — на воздухе. Отклик датчика на сигнал АЭ представлен на рис. 7.

2. Источник сигналов АЭ находится на воздухе, приемник (гидродатчик с наполнителем) — в воде. Отклик датчика на сигнал АЭ представлен на рис. 8.

Граничная среда вода–металл–вода (источник сигналов АЭ и приемник находятся в воде). Отклик датчика на сигнал АЭ представлен на рис. 9.

В результате проведенных работ установлены частотные границы при распространении УЗК в пластине при имитации различных граничных сред, а внесенные конструкционные изменения преобразователя позволили увеличить крутизну фронта волны, улучшить качество регистрации сигналов в материале.

С целью применения данного метода при контроле трубопроводов, проложенных в морской воде, изучалось влияние солености воды, которая определяет волновое сопротивление, на параметры АЭ сигналов. По концентрации соли в воде имитировали состав воды Черного, Средиземного и Мертвого морей. На датчик — генератор сигналов АЭ подавался отрицательный импульсный сигнал с параметрами: амплитуда $A = 400$ мВ; длительность $T = 1; 2; 4; 8; 16; 32$ мкс; частота следования $f = 1$ Гц. На осциллографе фиксировались значения амплитуды A , мВ выходного сигнала с гидродатчика. Расстояние между гидродатчиком и датчиком-генератором сигналов АЭ, установленными на металлической пластине, составляло $L_{база} = 300$ мм.

Результаты измерений приведены в таблице и на рис 10.

Для оценки точности определения координат источников сигналов АЭ при различных граничных средах подавали тестовый сигнал амплитудой $A = 4$ В и длительностью $T = 2$ мкс. Интервал подачи сигнала составлял $\Delta t = 1$ с. Использовали линейную антенну из двух датчиков, датчик № 1

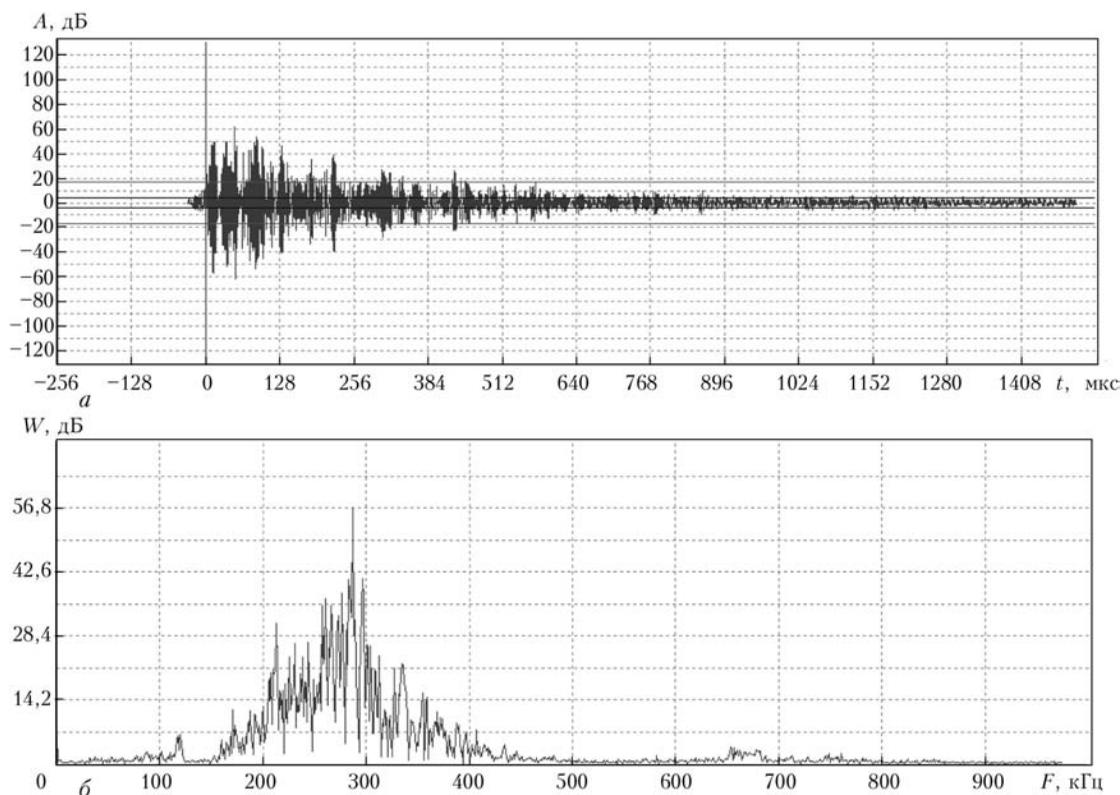


Рис. 7. Отклик датчика на сигнал АЭ (граничная среда воздух–металл–вода): а — осциллограмма; б — спектральная характеристика

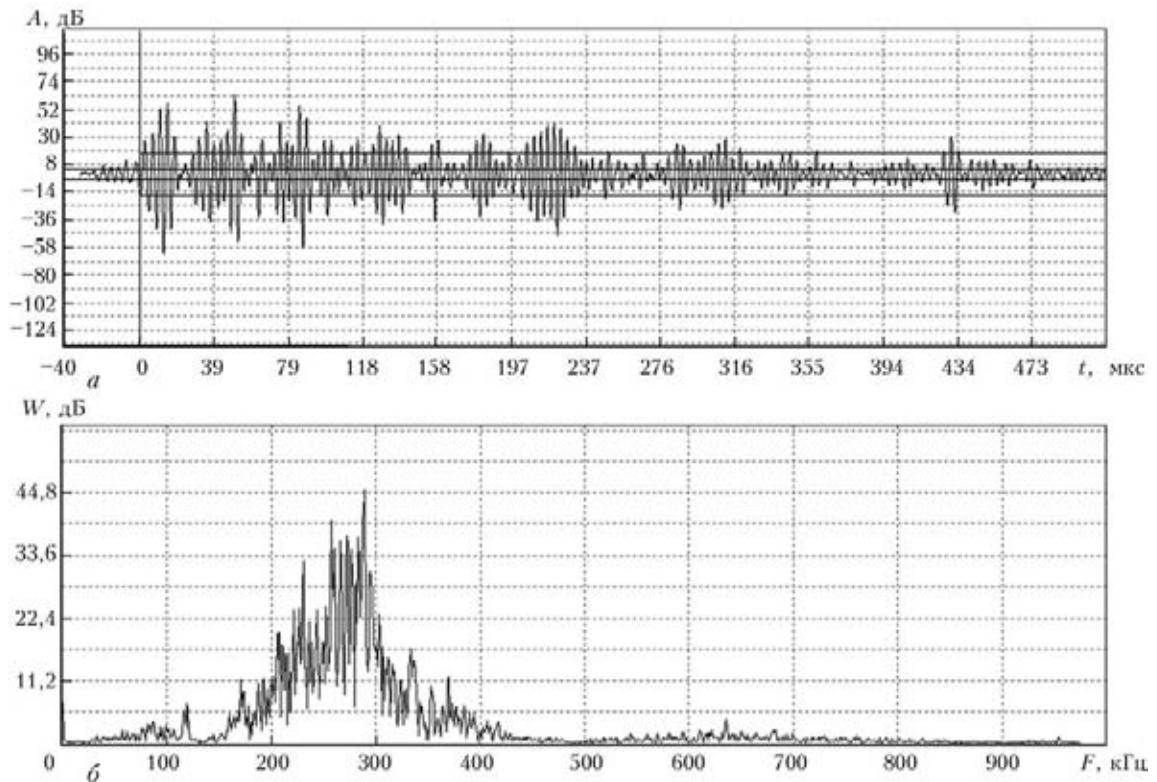


Рис. 8. Отклик датчика на сигнал АЭ (границная среда вода–металл–воздух): *a* — осциллограмма; *б* — спектральная характеристика

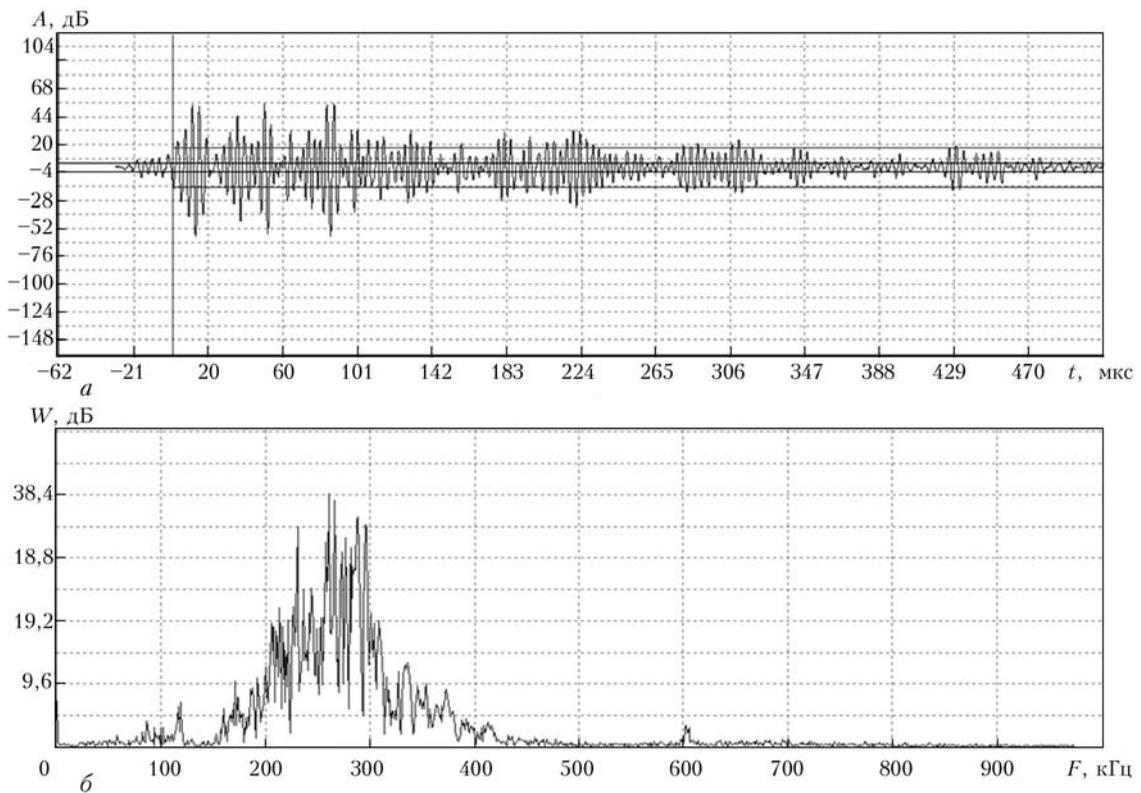


Рис. 9. Отклик датчика на сигнал АЭ (границная среда вода–металл–вода): *a* — осциллограмма; *б* — спектральная характеристика

— источник сигналов АЭ ($X = 0$). Скорость распространения сигнала в пластине (сухой) $v = 5,3$ мм/мкс.

Проведенные исследования показали, что при различном положении пластины с установленными датчиками (на воздухе; один из датчиков находится в воде, а второй — на воздухе; оба датчика



Таблица. Зависимость амплитуды сигнала с выхода гидродатчика от свойств граничной среды и длительности подаваемого сигнала

T, мкс	Амплитуда сигнала в зависимости от граничной среды, мВ				
	воздух–металл–воздух	вода–металл–вода			
		пресная	18 ‰	40 ‰	60 ‰
1	200	120	100	80	60
2	250	148	110	100	80
4	150	80	70	50	40
8	200	120	100	80	70
16	200	120	100	80	60
32	250	150	100	80	60

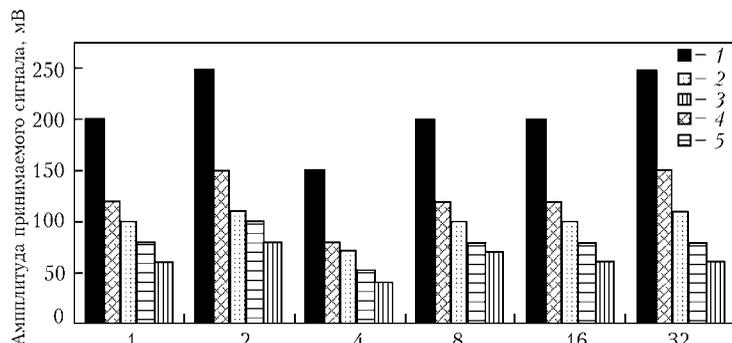


Рис. 10. Зависимость амплитуды сигнала от длительности исходного сигнала и характеристик граничной среды (солености воды): 1 — воздух–металл–вода; 2 — вода(18 ‰)–металл–вода (18 ‰); 3 — вода(60 ‰)–металл–вода (60 ‰); 4 — вода(пресная)–металл–вода (пресная); 5 — вода(40 ‰)–металл–вода (40 ‰)

находятся в воде) при работе аппаратуры в режиме логарифмического усиления при затухании сигнала в три раза погрешность определения координат источников АЭ не превышала 2 %.

Выводы

При работе датчика с наполнителем в условиях граничной среды воздух–металл–воздух (линейный коэффициент усиления) устранены механические резонансы на нижних частотах (демпфированы).

Поглощение сигнала в условиях граничной среды воздух–металл–вода (источник сигналов АЭ находится в воде, приемник — на воздухе, линейный коэффициент усиления) более чем в два раза по сравнению с граничной средой воздух–металл–воздух.

При нахождении источника сигналов АЭ на воздухе, а датчика-приемника в воде (граничная среда воздух–металл–вода, линейный коэффициент усиления) поглощение сигнала более чем в три раза больше по сравнению с граничной средой воздух–металл–воздух.

В условиях граничной среды вода–металл–вода (линейный коэффициент усиления) поглощение сигнала более чем в четыре раза больше по сравнению с граничной средой воздух–металл–воздух.

При увеличении солености воды как граничной среды коэффициент затухания акустического сигнала увеличивается, в результате чего зона контроля уменьшается.

Внесенные изменения в конструкцию датчика позволяют, например, упростить методику проведения АЭ контроля указанных выше объектов с учетом глубины залегания объекта под водой. В частности, устанавливать датчик АЭ на открытом участке или на небольших глубинах с учетом особенностей распространения звуковых волн.

Полученные результаты показали целесообразность применения АЭ метода для контроля состояния различных объектов (трубопроводов различного назначения, корпусов суден, плавучих и стационарных морских платформ и т. д.), эксплуатирующихся в условиях водной среды.

1. РД 153-34.-20.673–2005. Методические рекомендации по техническому диагностированию трубопроводов тепловых сетей с использованием акустического метода.
2. Овчинников А. Л. Особенности распространения сигналов акустической эмиссии утечек в трубопроводах с жидкостью и аппаратура контроля герметичности / Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Томск: 2006. — 15 с.
3. Болотина И. О. Пассивный контроль герметичности подводных трубопроводов с использованием акустических фазированных антенных решеток / Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Томск: 2004. — 12 с.
4. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: Индпром, 2008. — 814 с.

Поступила в редакцию 08.10.2012



ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ УРОВНЕМЕРОВ

С. А. НАЙДА, д-р техн. наук (НТУУ «Киевский политехнический институт»)

Получены соотношения для расчета преобразователя с высокой модой изгибных колебаний. В преобразователе применяется многослойное согласующее покрытие. В результате обеспечивается возможность определения уровней до 61 м, а амплитуда колебательной скорости на рабочей поверхности достигает величины, достаточной для ее самоочищения.

Relationships were derived for design of transducers with a high mode of bending vibrations. A multilayered matching coating is used in the transducer. As a result, the possibility of determination of up to 61 m levels is provided, and the amplitude of vibrational speed on the working surface reaches the value sufficient for its self-cleaning.

Действие большинства УЗ уровнемеров основано на измерении времени распространения УЗ волн в воздухе от преобразователя до контролируемой поверхности и обратно при известной (или измеряемой) скорости звука [1–6].

Наибольшее распространение получили эхоимпульсные воздушные уровнемеры. Длительность зондирующих импульсов в них $t_{\text{и}}$ не должна превышать удвоенного времени распространения ультразвука от преобразователя до контролируемой поверхности при минимальном расстоянии L_{min} до этой поверхности:

$$\tau_{\text{и}} \leq \frac{2L_{\text{min}}}{c}, \quad (1)$$

где c — скорость звука в воздухе.

Воздушное зондирование в диапазоне частот 10...200 кГц применяется для сыпучих тел и жидкостей с большим затуханием. Основным источником погрешностей при таком способе измерений заключается в зависимости скорости распространения от температуры воздуха:

$$\alpha = \Delta c / \Delta t = 0,59 \text{ м/с} \cdot \text{°С}. \quad (2)$$

При $\Delta t = 50 \text{ °С}$ значение $\Delta c = 0,59 \cdot 50 \cong 30 \text{ м/с}$ составляет 10 % скорости $c = 340 \text{ м/с}$. Включение в схему прибора опорного (реперного) канала для компенсации изменения скорости частично исключает эту погрешность. В большинстве случаев реперный канал представляет собой дополнительный преобразователь, установленный на фиксированном расстоянии l от реперного отражателя, т. е. в пределах мертвой зоны обычно $l = 0,5 \text{ м}$. При этом, естественно, остается погрешность, обусловленная наличием градиента скорости УЗ по высоте емкости.

Существенное затруднение представляет создание эффективных излучателей УЗ для газовой среды. Удовлетворительного согласования с акустическим импедансом среды в случае пьезоэлек-

трических преобразователей удается достичь с использованием изгибных мод колебаний излучающего элемента. Приемники, как правило, тоже применяют пьезоэлектрические.

Для случая совмещенного преобразователя важным фактором является отношение принятого сигнала к уровню помех (шумов). Это отношение ограничивает возможности уровнемера, диапазон его работы и мертвую зону, где сигнал не может быть принят из-за большой амплитуды послезвучания датчика. Обычно зона составляет 0,5 м при добротности акустических датчиков $Q \cong 50$. Длительность зондирования определяется необходимостью иметь 10...20 колебаний высокой частоты в канале радиоимпульса ($t_{\text{и}} = (10...20)T$). Тогда при частоте 50 кГц ($T = 20 \text{ мкс}$) получаем требуемую длительность 0,2...0,4 мс.

Из-за наличия давления в контролируемой емкости, влияния ее стенок, необходимости измерения слоя жидкости, состава газа и температуры к уровнемерам предъявляют более жесткие требования относительно конструкций акустических датчиков и к построению электронных схем. Считалось, что для эксплуатации в промышленных условиях наиболее приемлемой конструкцией акустического датчика для измерения и приема УЗ колебаний в воздухе (газе) является «пьезоэлектрический преобразователь с преобразованием поршневых толщинных колебаний в изгибные с применением согласующих крышек резонаторов и рупоров». Механизм такого преобразования автор [4] не раскрывает.

Рассмотрим современные преобразователи серии LR (long range) фирмы «Milltronics», которые обеспечивают максимальную передачу акустической энергии и гарантируют эффективную работу в диапазонах до 61 м в самых сложных условиях в различных отраслях промышленности. Режим акустической вибрации позволяет работать без техобслуживания в условиях высокой запы-



ленности, турбулентности паров и электромагнитных помех.

Параметры преобразователей серии LR приведены в табл. 1, а конструкция представлена на рис. 1 [7]. Изгибные колебания диска возбуждаются с помощью привода, скрепленного с диском в его центре. В результате отражения от окружности закрепления диска в корпусе в нем возникает стоячая в радиальном направлении волна, в которой смещения и скорости в смежных пучностях имеют противоположные знаки, поэтому излучение в тыльную сторону отсутствует.

С фронтальной стороны эффективность излучения увеличивается в результате наложения определенным образом многослойного материала, согласующего акустические импедансы. Разработанная и запатентованная Milltronics многослойная система обеспечивает возможность определения уровней до 61 м.

Получить соотношения для расчета этой системы и явилось целью настоящей работы.

Следует отметить еще одно преимущество преобразователя типа LR, которое не отмечается в работах [7, 8]: он значительно легче из-за отсутствия цилиндра из пьезокерамики. Поэтому может подвешиваться на кабеле, что приводит к значительному уменьшению акустических помех по фланцу, а следовательно, увеличению отношения сигнал-шум.

Поскольку пьезопреобразователи с изгибной модой колебаний тоже должны характеризоваться указанным преимуществом, нами были проанализированы возможности их создания и в случае больших диаметров. Препятствием для этого является возбуждение, аналогично громкоговорителям [11], высокомодовых колебаний и падение эффективности излучения. Один из путей устранения паразитных колебаний используется при создании пьезоэлементов УЗ сканеров: разбиение элемента на электрически соединенные, но акустически изолированные пьезоэлементы. Правда, и используются не изгибные, а толщинные колебания.

Изгибные колебания тонкого диска. Свободные колебания. Основой акустического излучателя-приемника уровнемеров LR-21, LR-13 является тонкий диск радиусом a , не имеющий натяжения и зажатый по контуру. Вывод волнового уравнения свободных колебаний пластины требует ряда сложных рассуждений и да-

ется подробно в курсах теории упругости. Оно имеет следующий вид [9, 10]:

$$\nabla^4 y - k^4 y = 0, \quad (3)$$

где ∇ — оператор дифференцирования; $y(t) = y(r, \varphi)e^{-i\omega t}$, $y(r, \varphi)$ — распределение амплитуд смещения; $k^4 = \omega^2 \rho h / D$; $D = Eh^3 / 12(1 - \sigma^2)$ — цилиндрическая жесткость на изгиб; E — модуль упругости (Юнга); σ — коэффициент Пуассона материала диска; h и ρ — его толщина и удельная плотность.

Видно, что уравнение (3) распадается на два уравнения:

$$\nabla^2 y + k^2 y = 0, \quad (5)$$

$$\nabla^2 y - k^2 y = 0. \quad (6)$$

В полярных координатах решение уравнения (5) будет:

$$Y = \frac{\cos}{\sin} m \varphi J_m(kr),$$

где m — целое число; J_m — функция Бесселя первого рода m -го порядка.

Решение уравнения (6) получаем заменой k на ik :

$$Y = \frac{\cos}{\sin} m \varphi I_m(kr),$$

где $I_m(kr) = i^{-m} J_m(ikr)$ — модифицированная или гиперболическая функция Бесселя m -го порядка.

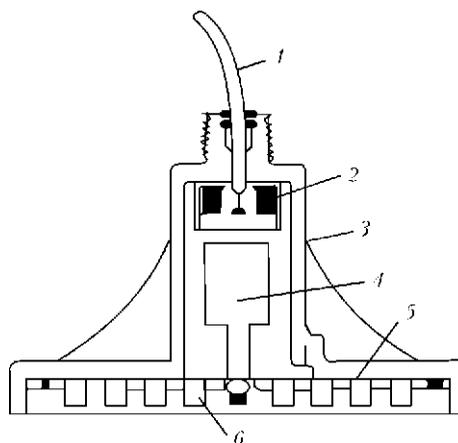


Рис. 1. Конструкция преобразователя серии LR: 1 — кабель; 2 — преобразователь; 3 — алюминиевый корпус; 4 — привод; 5 — диск с изгибной модой колебаний; 6 — устойство для согласования акустических импедансов, изготовленное из пенопласта

Таблица 1. Параметры преобразователей фирмы «Milltronics» серии LR

Тип	Частота, кГц	Максимальный диапазон, м	Угол излучения, град.	Температура, °С	Диаметр преобразователя, мм	Диаметр фланца, мм
LR-21	21	30	5,5	-40 +77	172	267
LR-13	13	61	5,5	-40 +77	268	356



Общее решение уравнения (3) имеет вид:

$$Y(r, \varphi) = \frac{\cos}{\sin} m\varphi [AJ_m(kr) + BI_m(kr)]. \quad (7)$$

Граничные условия, соответствующие зажатому по контуру радиуса α диску, следующие:

$$Y(r, \varphi) = 0, \\ dY/dr_{r=\alpha} = 0.$$

Первое условие будет удовлетворено, если положить

$$B = -A \frac{J_m(ka)}{I_m(ka)}, \quad (8)$$

а второе — если взять значение k , удовлетворяющее условию

$$I_m(kr) \frac{d}{dr} J_m(kr) - J_m(kr) \frac{d}{dr} I_m(kr) = 0 \text{ при } r = a. \quad (9)$$

Собственные частоты колебаний такого диска определяются выражением:

$$f_{mq} = \frac{\pi h}{4a^2} \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\sigma^2)}} \cdot \beta_{mq}^2, \quad (10)$$

где $\beta_{mq} = \frac{(ka)_{mq}}{\pi}$, $(ka)_{mq}$ — q -й корень уравнения (9).

Ограничившись случаем $m = 0$, получим:

$$\beta_{01} = 1,015; \beta_{02} = 2,007; \beta_{03} = 3,000; \beta_{0q} \xrightarrow{q \rightarrow \infty} q. \quad (11)$$



Рис. 2. Рабочая поверхность преобразователя LR-13

В результате свободных колебаний диска в нем устанавливается стоячая по радиусу волна, причем узловые радиусы определяются выражением:

$$r_{0q} = \frac{\pi}{k} \beta_{0q} = a \frac{\beta_{0q}}{\beta_{0\max}}. \quad (12)$$

Их необходимо знать для размещения на поверхности диска элемента двойного акустического согласования. Условие тонкой пластины, а следовательно, и применимости приведенных выше выражений имеет вид:

$$hk \ll 1, \quad (13)$$

или с учетом того, что $k = \frac{\pi}{a} \beta_{0\max}$,

$$\frac{\pi h}{a} \beta_{0\max} \ll 1. \quad (14)$$

Время установления режима стоячей волны, будет:

$$\tau_{уст} = \frac{2ak}{\omega} = \frac{4a}{\sqrt{E/3\rho(1-\sigma^2)}} \frac{1}{(\pi h/a) \beta_{0\max}}. \quad (15)$$

При возбуждении импульсами УЗЧ полученные выражения применимы, если

$$\tau_u \gg \tau_{уст} \quad (16)$$

Для сопоставления выражения (9) с расположением узловых радиусов в датчике LR-13 (рис. 2) [7] были измерены диаметры окружностей, отделяющих канавки от выступов в пенопласте и выявлено, что углубление в центре объединяет области с $q = 1$ и $q = 2$, т. е. первым узловым радиусом является r_2 . Отношения последующих радиусов к r_2 представлены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что уже при $q \geq 4$ измеренное отношение находится между теоретическими, но ближе к отношению корней функции Бесселя. Это можно объяснить следующим образом. Функции Бесселя являются решением уравнения (5) Бесселя, которое является также уравнением колебаний мембраны, и описывают две бегущие волны. Гиперболические функции Бесселя $I_m(ka)$ являются решением уравнения (6) и описывают экспоненциально убывающие с расстоянием волны. Поэтому для эффективного использования всей поверхности диска необходимо, чтобы второй член в квадратных скобках выражения (7) на большей части поверхности был мал, что и достигается коррекцией радиуса α при заданной частоте резонанса.

Таблица 2. Отношение последующих радиусов к r_2 , измеренное и полученное с учетом значений выражений (11), и для $J_0(kr)_q$

q	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
r_q/r_2	1	1,56	2,00	2,7	3,15	3,75	4,25	4,82	5,40	6,0	6,45
для (11)	1	1,50	2,00	2,5	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	5,5	6,00
$J_0(kr)$	1	1,58	2,14	2,7	3,28	3,85	4,40	5,00	4,47	6,1	6,7



Вынужденные колебания. Поскольку в интересующем нас случае распределение свободных колебаний по поверхности диска аналогично распределению по поверхности мембраны, можно воспользоваться результатами рассмотрения вынужденных колебаний мембраны [9]. Круглые мембраны используются обычно в микрофонах. Колебания таких мембран, а также диска равномерного при изгибе, происходят под действием равномерно распределенной по их поверхности силы, обусловленной звуковым давлением, в связи с чем смещения симметричны относительно центра, т. е. при заданном r не зависят от φ . Решение неоднородного уравнения установившегося режима и амплитуды смещения будет иметь вид:

$$y = AJ_0(kr) - \frac{P_m}{P\omega^2}, \quad (17)$$

где P_m — амплитуда давления.

Величина A определяется из граничного условия $y(a) = 0$. Тогда

$$y = \frac{P_m}{P\omega^2} \left[\frac{J_0(kr)}{J_0(ka)} - 1 \right]. \quad (18)$$

Как видим, при тех значениях ka , когда $J_0(ka) = 0$, функция $y \rightarrow \infty$, т. е. наблюдаются резонансы, так что резонансные частоты совпадают с собственными частотами колебаний мембраны

$$ka = \pi\beta_{0n} \cong (n - \frac{1}{4})\pi. \quad (19)$$

Отметим, что в микрофонах $ka < 1$, тогда как в нашем случае, наоборот, $ka \gg 1$ (при $n = 12$, $ka = 36,8$).

Многослойное двумерное согласование. Техника двумерного согласования в литературе не рассматривалась, а была запатентована фирмой «Milltronics». Рассмотрим режим излучения. Известно [10], что влияние среды, окружающей мембрану, зависит прежде всего от того, происходит ли распространение волн в среде быстрее или медленнее, чем распространение изгибных волн в самой мембране. Если средой является воздух, то случай, когда $v_{ср} \ll v_{мб}$, практически встречается редко, но расчет установившегося движения при этом не вызывает затруднений.

В случае $v_{ср} \ll v_{мб}$ эффективность движения одной части поверхности быстро передается через среду и влияет на другие участки, так что в пределе реакция среды однородна по всей мембране и пропорциональна среднему смещению \bar{y} .

Однако даже в случае тяжелой мембраны влиянием среды в первом приближении можно пренебречь. Это тем более можно сделать в случае пластины (диска).

Наиболее просто сделать диск излучающим можно, закрыв через одну кольцевые зоны между узловыми диаметрами акустическими экранами,

расположенными от диска на небольшом расстоянии. Тогда незакрытые зоны, колеблющиеся в фазе, будут действовать как поршень, и излучать звук в среду. Правда, интенсивность излучения в воздух из-за большой разницы акустических импедансов диска и воздуха будет малой. Увеличить ее можно, наклеив на излучающие зоны четвертьволновые слои с промежуточным значением импеданса. Однако такая система негерметична и непригодна для работы в сильно запыленной среде.

Решение проблемы состоит в следующем. На весь диск наклеивается пенопласт с канавками, глубина которых такая, что разность фаз колебаний, распространяющихся по пенопласту и воздуху, равна π . Это условие можно записать в виде

$$l = \frac{\lambda_B}{2} \frac{1}{1 - v_B/v_{п}}, \quad (20)$$

где v_B , $v_{п}$ — скорости распространения звука в воздухе и пенопласте соответственно.

Выбираем толщину пенопласта по дну канавки, равной $\lambda_{п}/4$, и полагаем

$$l = n\lambda_{п}/2, \quad (21)$$

т.е. путь звука в пенопласте нечетно кратен $\lambda_{п}/4$. Тогда с учетом (20) условие (21) принимает вид:

$$\frac{v_{п}}{v_B} = \frac{1+n}{n}. \quad (22)$$

Пусть, например, $f = 13$ кГц ($\lambda_B = 2,62 \cdot 10^{-2}$ м) и $n = 1$, тогда $\lambda_{п} = 5,25 \cdot 10^{-2}$ м, $\lambda_{п}/4 = 1,31 \cdot 10^{-2}$ м, $\lambda_{п}/2 = 2,62 \cdot 10^{-2}$ м. Таким образом, толщина пенопласта по дну канавки равна 1,3 см, а общая — 3,9 см; $v_{п} = 2v_B = 680$ м/с. Близкое значение скорости продольных волн $v_{п} = 850 \pm 10$ м/с имеет, например, пенополиуретан ППУ-3 с объемным весом $\rho = 2,00$ кг/м³ (для воздуха $\rho_B = 1,22$ кг/м³). Однако применение только одного четвертьволнового согласующего слоя, представляющего в месте контакта с ним пластины удельную акустическую нагрузку $z_{вх} = z_{сл}^2/z_B = 69 \cdot 10^6$ Па·с/м, создает торможение диска.

Учитывая, что $L_{min} = 0,9$ м для LR, получаем согласно (1) $\tau_{п} \leq 5,3$ мс.

Для частоты 13 кГц ($T = 7,8$ мкс) это составляет $f\tau_{п} = 69$ периодов, тогда как для измерения достаточно всего (10...20) периодов, т. е. в 3...7 раз меньше. Такое превышение длительности импульса необходимо для «встряхивания» пыли или конденсированных на поверхности паров жидкости.

Пример расчета пьезопреобразователя с высокой модой изгибных колебаний. Ориентируясь на максимальную дальность в пыльной среде 30 м, выберем частоту и размер диска, равными использованным в датчике LR-21 ($f = 21$ кГц, $a = 12,7$ см).



1. Определим толщину диска из выражения (10) и взяв $\beta_{012} = 11,75$ в соответствии с (19):

$$h = \frac{4a^2 f_{012}}{\pi \beta_{012}^2} \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\sigma^2)}} = 3,26 \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\sigma^2)}} \text{ (м)}.$$

Для стали $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па, $\rho = 8 \cdot 10^3$ кг/м³, $\sigma = 0,265$:

$$\sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\sigma^2)}} = 3 \cdot 10^3 \text{ м/с}, h_{ст} = 1,1 \text{ мм};$$

для алюминия (дюралю) $E = 0,774 \cdot 10^{11}$ Па, $\rho = 2,7 \cdot 10^3$ кг/м³, $\sigma = 0,353$:

$$\sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\sigma^2)}} = 3,32 \cdot 10^3 \text{ м/с}, h_{Al} = 0,98 \text{ мм}.$$

2. Определим величину k из соотношения

$$k = \frac{\pi}{a} \beta_{012} = 2,9 \cdot 10^2, \text{ и}$$

$$v_{изл} = \frac{\omega}{k} = 4,55 \cdot 10^2 \text{ м/с} < 8 \cdot 10^2 \text{ м/с}$$

где $8 \cdot 10^2$ м/с — скорость звука в пенопласте.

3. Проверяем условие тонкой пластины

$$h_{ст,Al} k \cong 0,29 \ll 1.$$

Индукционный привод диска. Индукционный привод диска (рис. 2) представляет собой трансформатор, многослойная первичная обмотка которого закреплена, а вторичная образована цилиндром из ферромагнитного материала, скрепленного жестко с центральной частью диска. Снаружи первичной обмотки находится замкнутый цилиндр определенной формы, сжимающий переменное магнитное поле по оси подвижного цилиндра-якоря. Переменный ток вызовет силу притяжения якоря дважды за период тока, так как наводимая во вторичной обмотке ЭДС и ток будут иметь противоположное направление по отношению к первичной обмотке.

При большой величине тока в подвижном цилиндре будет наводиться индукция насыщения, вектор которой будет иметь в основном продоль-

ную компоненту, так как длина цилиндра намного больше толщины стенок.

При движении диска под действием эхо-сигнала переменный магнитный поток через соленоид, обусловленный намагниченностью подвижного цилиндра, создает в обмотке ЭДС. Поскольку частота эхо-сигнала в два раза больше частоты возбужденного тока, то цепи генератора и приемника не оказывают взаимного влияния.

Выводы

Получены соотношения для расчета преобразователя с изгибной модой колебаний. Рассмотрены особенности разработки системы многослойного согласования преобразователя с воздухом. В результате трансформации колебательной скорости в слоях ее амплитуда на рабочей поверхности преобразователя достигает такой величины, что становится возможным ее самоочистление. Кроме того, применение двумерного согласования в преобразователе уровнемера позволяет увеличить его дальность действия до 61 м.

1. Радж Балдев, Раджендран В., Паланичами П. Применение ультразвука. — М.: Техносфера, 2006. — 576 с.
2. Шарипов В. М., Мусиенко М. П., Шарипова Е. В. Пьезоэлектрические датчики / Под ред. В. М. Шарипова. — М.: Техносфера, 2006. — 632 с.
3. Ультразвук. Малая энциклопедия / Под ред. А. П. Голяминой. — М.: Советская энциклопедия, 1979. — 400 с.
4. Бабиков О. И. Контроль уровня с помощью ультразвука. — М.: Энергия, 1971. — 98 с.
5. Бабиков О. И. Ультразвуковые приборы контроля. — Л.: Машиностроение, 1985. — 117 с.
6. Носов В. П. Проектирование ультразвуковой измерительной аппаратуры. — М.: Машиностроение, 1972. — 288 с.
7. Milltronics. Non-contacting ultrasonic transducers. Проспект.
8. Milltronics. Guide to simplified process measurement. Проспект.
9. Вахитов Я. Ш. Теоретические основы электроакустики и электроакустическая аппаратура. — М.: Искусство, 1982. — 415 с.
10. Морз Ф. Колебания и звук. — М.-П.: Гостехиздат, 1949. — 496 с.
11. Алдошина А., Войшвилло А. Г. Высококачественные акустические системы и измерители. — М.: Радио и связь, 1985. — 168 с.

Поступила в редакцию
28.09.2012

ДІАГНОСТУВАННЯ ОБЛАДНАННЯ НАФТОПОМПУВАЛЬНИХ СТАНЦІЙ МЕТОДОМ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ, д-р. техн. наук, **О. М. СТАНКЕВИЧ**, інж (Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів),
Р. М. БАСАРАБ (ВАТ «Укртранснафта», Львів)

Запропоновано методику технічного діагностування обладнання нафтопомпувальних станцій за амплітудно-частотними характеристиками сигналів акустичної емісії та параметрами їх вейвлет-перетворення. Розроблену методику застосовано під час планового обстеження нафтопомпувальної станції «Чижівка» філії «Магістральні нафтопроводи «Дружба» ВАТ «Укртранснафта».

A procedure is proposed for engineering diagnostics of equipment of oil-pumping stations by amplitude-frequency characteristics of acoustic emission signals and parameters of their wavelet transformations. The procedure was applied during scheduled inspection of Chizhivka oil-pumping station of «Magistralni naftoprovodi» affiliate of A procedure is proposed for engineering diagnostics of equipment of oil-pumping stations by amplitude-frequency characteristics of acoustic emission signals and parameters of their wavelet transformations. The procedure was applied during scheduled inspection of Chizhivka oil-pumping station of «Magistralni naftoprovodi» affiliate of «Ukrtransnafta» OJSC.

Забезпечення промислової та екологічної безпеки експлуатування магістральних нафтопроводів належить до пріоритетних задач для підприємств, що їх експлуатують, у будь-якій країні світу [1]. Це зумовлено великою кількістю аварій, що часто мають важкі економічні та екологічні наслідки [2–4]. У літературі подають різні статистичні дані щодо причин аварій на нафтопроводах [5–7]. Зокрема, у праці [5] приведено розподіл причин пошкоджень магістральних трубопроводів за різні періоди у Росії, США та Великобританії (рис. 1). Якщо у Росії за вказаний період часу найбільший відсоток (39 %) від загальної кількості відмов складають відмови, що зумовлені корозією, то у США та Великобританії найбільший відсоток (47 %) становлять відмови внаслідок механічних пошкоджень.

За оцінкою фахівців більшість причин аварій на нафтопроводах України включають людський

фактор [6]: зовнішні фізичні (силові) дії на трубопроводи, у тому числі кримінальні врізання, що спричиняють витoki — 34,7 %; порушення норм і правил проведення робіт під час будівництва і ремонту, відхилення від проектних рішень — 24,7 %; порушення технічних умов під час виготовлення труб і устаткування — 12,4 %; помилкові дії експлуатаційного і ремонтного персоналу — 4,7 %. Значний відсоток (23,5 %) аварій відбувається через корозійні пошкодження труб, запірної і регулюючої арматури. Якщо виключити людський фактор, то за останніми статистичними даними майже 80 % усіх відмов нафтопроводів зумовлено первинними корозійно-механічними пошкодженнями та утворенням і подальшим розвитком поверхневих тріщиноподібних дефектів у місцях корозійних каверн і зварних з'єднань [8].

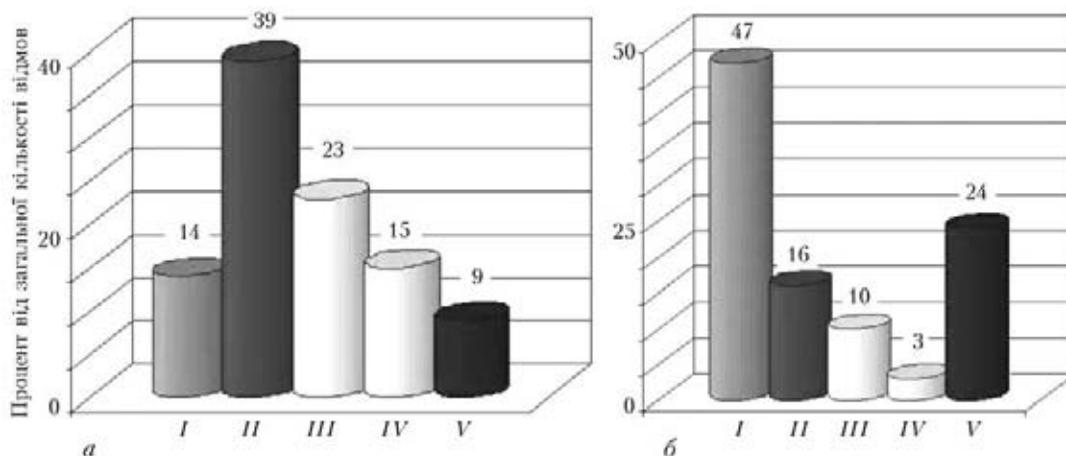


Рис. 1. Розподіл причин пошкоджень магістральних трубопроводів (%) від загальної кількості відмов: а — у Росії за період 1992–2002 рр.; б — у США та Великобританії 1990–2000 рр. (I — механічні пошкодження; II — корозія; III — пошкодження під час будівництва чи ремонту; IV — дефекти матеріалів; V — інші)



Для забезпечення безперебійного та безпечного постачання нафтопродуктів трубопровідну систему необхідно підтримувати у працездатному стані, здійснюючи контроль за технічним станом її ділянок. На сьогодні для технічного діагностування магістральних нафтопроводів застосовують різноманітні методи і засоби НК, які дають змогу оцінити технічний стан системи та зробити висновок про можливість її подальшої безпечної експлуатації [9]. Під час оцінки технічного стану трубопроводу найважливіше місце належить достовірному діагностуванню як лінійної частини, так і окремих вузлів та агрегатів технологічного обладнання, яке використовують для їх обслуговування. Спочатку на основі діагностики внутрішнього стану труб здійснюють первинний контроль, який дозволяє виявляти дефекти і визначати орієнтовно місця їх розташування. Після цього дефектні місця досліджують іншими методами НК та приймають рішення щодо допустимості дефекту чи встановлення ділянки трубопроводу в ремонтну чергу для забезпечення безпечної експлуатації.

Стан проблеми. Існуючі традиційні методи НК зорієнтовані в основному на пошук дефектів та визначення їх геометричних розмірів. Найпоширенішими і добре розвинутими серед сучасних методів НК для виявлення експлуатаційних дефектів типу тріщин є акустичні методи (акустичної емісії (АЕ), ультразвуковий), які мають суттєві переваги серед інших [10]. Вони мають високу чутливість, надійність і простоту застосування. Контроль об'єктів акустичними методами є найпродуктивнішим, має найкраще співвідношення вартість–достовірність отриманих результатів у порівнянні з іншими методами НК. Фізичну основу методів НК становлять дослідження змін характеристик металів і виявлення дефектів, що спричиняють ці зміни.

За час довготривалої експлуатації магістральних трубопроводів відбувається зміна структури металу, його механічних властивостей, з'являються корозійно пошкоджені та напружені ділянки трубопроводів [8, 11], що призводить до передчасного зародження та поширення поверхневих тріщин. Складною неоднорідною та термодинамічно нестійкою системою є зварні з'єднання, переважно через відмінності за хімічним складом та структурою окремих зон, наявністю залишкових напружень та пластичних деформацій [12]. Умови для руйнування створюють динамічні навантаження, які разом із структурними напруженнями ініціюють виникнення тріщин. Локалізація корозії зазвичай викликана мікронеоднорідністю металу і є однією з причин виникнення мікротріщин чи пігінгів, які розвиваються в мікро- та макротріщини [13].

Із позиції механіки руйнування розвиток тріщиноподібних дефектів (крихке руйнування)

складає найбільшу небезпеку щодо цілісності та безвідмовної роботи об'єкта, тому для технічної діагностики побудовано низку критеріїв та методик, які дозволяють ідентифікувати тип макроруйнування конструкційних матеріалів (крихке чи в'язке) на ранніх стадіях його розвитку та у будь-який момент часу експлуатації конструкції чи виробу. За аналізом зарубіжних і вітчизняних літературних джерел на сьогодні існує низка підходів щодо ідентифікування типів макроруйнування методом АЕ.

У 1960-х роках зроблено перші спроби ідентифікації сигналів АЕ за амплітудно-частотними характеристиками [14]. На думку авторів АЕ добре відображає процеси, які корелюють із механічними параметрами росту тріщини, зокрема зі швидкістю поширення та динамічними змінами в області її вершини. У праці [15] досліджували взаємозв'язок енергії АЕ та механізму пластичної деформації і руйнування. За результатами досліджень встановлено співвідношення для визначення енергії сигналів за їх амплітудами та визначено числові значення енергії для сигналів, що відповідають різним типам руйнування: процеси пластичної деформації характеризуються виділенням енергії порядку 10^{11} – 10^7 Дж, у той час як процес руйнування супроводжується великою кількістю енергетичних імпульсів 10^6 – 10^1 Дж. Під час вивчення процесу повільного поширення тріщини у високоміцній сталі [16] розроблено модель росту тріщини, яка встановлює зв'язок між площею підростання макро- та макротріщини та сумарним рахунком і амплітудою сигналів АЕ. Авторами праць [17] за результатами теоретичних та експериментальних досліджень уперше встановлено, що на стадії докритичного росту тріщини нормального відриву ширина смуги частот сигналів АЕ обернено пропорційна квадратові коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН). На основі цього зроблено важливий висновок, що звуження смуги частот можна взяти за критерій ідентифікації стадій докритичного росту тріщини, а за її шириною можна визначити КІН, а відтак і розраховувати міцність елемента конструкції під час його експлуатації. Пізніше запропоновано критерій оцінки типів макроруйнування за найстійкішими параметрами сигналів АЕ, який враховує специфіку зміни їх амплітудно-частотних характеристик, час наростання переднього фронту імпульсу і режими відбору АЕ-інформації під час докритичного росту тріщин [10]. Більшість згаданих критеріїв ідентифікування типів руйнування побудовані на основі аналізу частотного спектра сигналу, який отримують за допомогою перетворення Фур'є. У працях [18, 19] для кількісної оцінки типів руйнування конструкційних матеріалів запропоновано критерій за основними параметрами неперервного вейвлет-перетворення (НВП) сигналів АЕ.

Таким чином, використовуючи ефективні методи оцінки типів руйнування конструкційних матеріалів, можна у реальному режимі часу оцінити стан матеріалу об'єкта контролю (ОК), виявивши найнебезпечніші механізми руйнування, та, водночас, запобігти виникненню аварійної ситуації.

Нафтотранспортна система України, експлуатацію якої здійснює ВАТ «Укртранснафта», складається з 19 нафтопроводів діаметром до 1220 мм включно загальною довжиною 3506,6 км (в одну нитку — 4767,1 км). Пропускна спроможність системи на вході — 114 млн. т/рік, на виході — 56,3 млн. т/рік. Роботу нафтопровідної системи забезпечує 51 нафтопомпвальна станція (НПС) [20]. До основних об'єктів системи магістральних нафтопроводів належить українська ділянка трансконтинентального нафтопроводу «Дружба». Зокрема, складовою частиною цього нафтопроводу є НПС «Чижівка», яка обслуговує ту його частину, що проходить через три області України (Житомирську, Хмельницьку, Рівненську) загальною протяжністю 500 км. Станція складається з двох черг. Перший пуск агрегату на НПС було здійснено 1 листопада 1967 р. Основна функція станції полягає у забезпеченні перекачування нафти від Мозиря до Бродів та підтримання тиску у трубопроводі.

Мета роботи — на основі критерію оцінки типів руйнування конструкційних матеріалів за

параметрами вейвлет-перетворення сигналів АЕ виявити утворення та розвиток тріщиноподібних дефектів на обладнанні НПС, встановити ступінь їх небезпеки та видати рекомендації щодо подальшого його експлуатування.

Методика досліджень. Характерною особливістю НВП сигналів є можливість виявлення локальних екстремумів структури досліджуваного процесу [21]. Високий рівень вейвлет-коєфіцієнтів свідчить про наявність у сигналі особливостей (розривів, сходинок, піків тощо), які відповідають одночасно особливостям процесів, що породжують ці сигнали. Ураховуючи властивості коефіцієнтів НВП та результати експериментальних досліджень процесів руйнування у різних конструкційних матеріалах [18, 19], для встановлення типу руйнування запропоновано такий алгоритм обробки сигналів АЕ (рис. 2):

1) покладаємо ширину робочої смуги АЕ-тракту $\Delta f_0 = 0,4$ МГц (якщо смуга робочих частот використаного первинного перетворювача сигналів АЕ (ПАЕ) становить $0,2 \leq f_0 \leq 0,6$ МГц, в іншому випадку під час обчислень критеріального параметра необхідно врахувати поправковий множник);

2) наступним кроком обробки АЕ сигналу є видалення шумової компоненти, що дозволяє зменшити об'єм даних, а відтак ефективніше використовувати ресурси персонального комп'ютера;

3) для отриманого очищеного сигналу будемо його НВП на основі вейвлета Габора [22]; фіксуємо момент часу, коли вейвлет-коєфіцієнт набуває максимального значення WT_{\max} та відповідну йому частоту f_{\max} ;

4) будемо проекцію вейвлет-перетворення на площину « $WT-f$ » у зафіксований момент часу і визначимо ширину смуги спектра частот Δf на рівні $0,7 \cdot WT_{\max}$ (як прийнято у практиці обробки інформаційних сигналів);

5) обчислюємо значення критеріального параметра k :

$$k = \frac{WT_{\max} \Delta f_0}{\Delta f}, \quad (1)$$

який враховує максимальне значення вейвлет-коєфіцієнта WT_{\max} , ширину смуги частот сигналу АЕ Δf , що йому відповідає, та ширину робочої смуги АЕ-тракту Δf_0 . Якщо отриманий результат задовольняє нерівність $0,1 < k$, то відповідний сигнал АЕ характеризує в'язкі механізми руйнування, що відбуваються у матеріалі. Якщо $k \geq 0,2$, то можна стверджувати про утворення та розвиток у конструкційному матеріалі тріщиноподібних дефектів (крихке

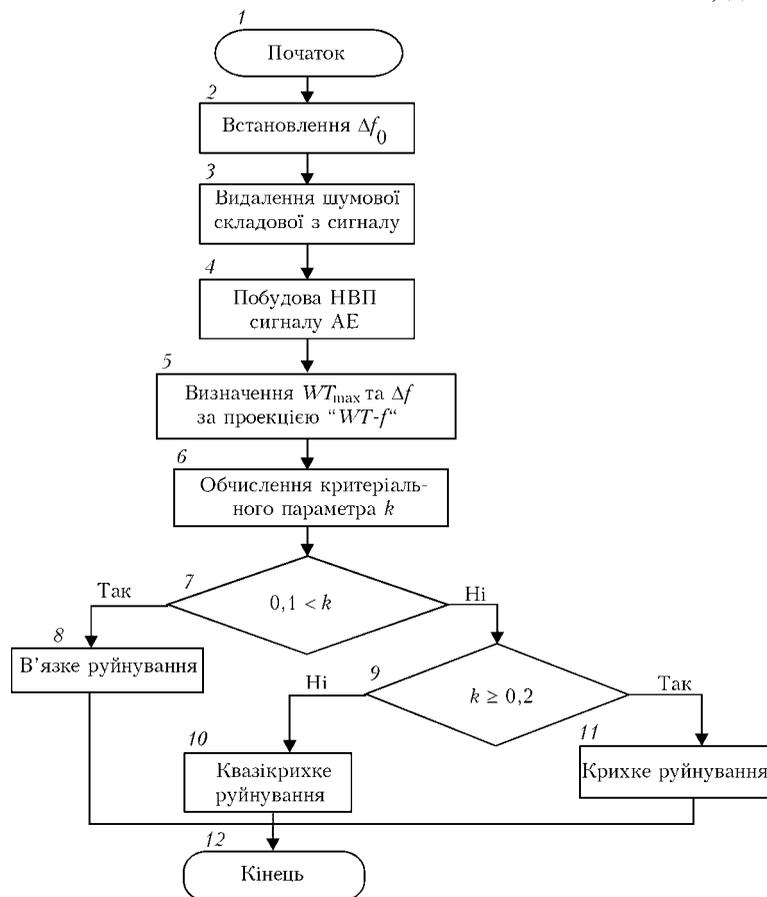


Рис. 2. Структурна схема алгоритму оцінки типів макроруйнування



руйнування), чим більше значення параметра, тим більша небезпека руйнування в об'єкті контролю.

Результати досліджень та їх обговорення. Випробування надземного технологічного обладнання НПС здійснювали одночасно двома АЕ-системами SKOP-8М за навантаження його внутрішнім тиском із одночасною реєстрацією сигналів АЕ. Для випробувань на окремих ділянках станції тиск у нафтопроводі змінювали двома способами: 1) зменшенням з 3,8 до 0,9 МПа; 2) нагнітанням тиску компресорною станцією від 0 до 4,2 МПа.

Перед початком робіт було здійснено відповідні налаштування портативної АЕ-системи SKOP-8М: кількість вимірювальних каналів — 8 (підсилення кожного 40 дБ); тривалість вибірки, мс — 2; період дискретизації аналогового сигналу, мкс — 0,5; частота зрізу фільтра низьких частот, кГц — 1000; фільтра високих частот, кГц — 40; поріг дискримінації, % — 28; рівень власних шумів, приведених до входу попереднього підсилювача, мкВ — 7.

Для АЕ-дослідження зародження та розвитку дефектів в елементах обв'язки фільтрів використали квазірезонансні ПАЕ з робочою смугою частот 0,2...0,6 МГц. Коефіцієнт підсилення попередніх підсилювачів становив 34 дБ, сигнали АЕ реєстрували в смузі частот 200...600 кГц, що визначалася технічними характеристиками ПАЕ та фільтрами високих і низьких частот відповідно. Діагностування проводилось за температури

довкілля та ОК +32 °С і максимального тиску у трубопроводі 4,2 МПа.

За розробленою у ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України методикою [10] проводили експериментальне визначення коефіцієнта зникання пружних хвиль АЕ. Відповідно, спочатку ПАЕ розташовували на трубопроводі за лінійною схемою з кроком 0,3 м та збуджували пружну хвилю АЕ на віддалі 0,3 м від першого ПАЕ за допомогою зонда-імітатора АЕ-системи SKOP-8М. Зареєстровані максимальні амплітуди сигналів АЕ апроксимували залежністю:

$$y = de^{-\delta x},$$

де δ — коефіцієнт зникання; x — шлях проходження хвилі; d — коефіцієнт апроксимації.

Це дозволило зробити висновок, що ПАЕ на прямих ділянках нафтопроводу можна розташовувати з кроком не більше 4 м, а на технологічному обладнанні (засувки, клапани, трійники, коліна, корпуси обладнання, що виготовлені за допомогою литва) — не більше 1 м.

За результатами АЕ-досліджень на всіх ОК було зареєстровано сигнали, які не перевищували встановлений поріг дискримінації (система їх реєструвала як шуми), та сигнали АЕ, які згідно з інтегральними критеріями (РД 03-131-97) класифікації джерел АЕ за ступенем небезпеки належать до I класу [10] — пасивні джерела. На рис. 3 зображено характерний вид таких сигналів

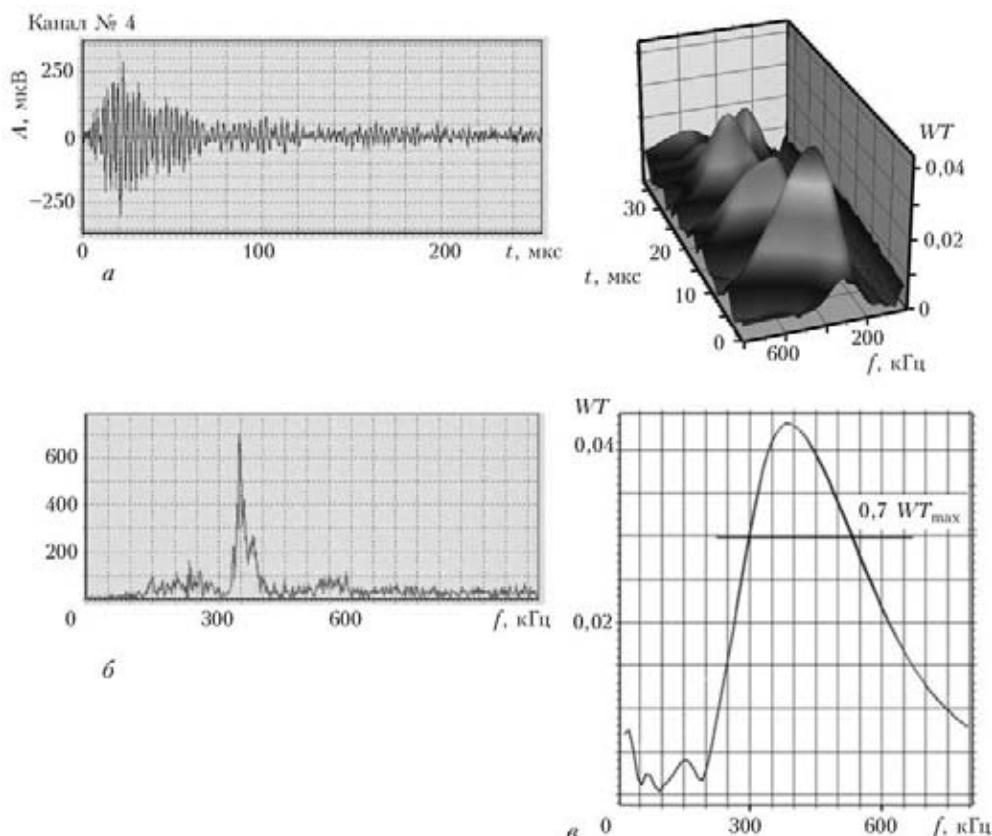


Рис. 3. Хвильове відображення (а), спектральні характеристики (б) та НВП (в) сигналу АЕ від пасивного джерела



АЕ. Їх особливістю є невеликі значення максимальних амплітуд (до 300 мкВ) (рис. 3, а) та широкі смуги домінуючих частот (рис. 3, б). За НВП для цих сигналів характерні низькі значення максимальних вейвлет-коефіцієнтів $0,03 \leq WT_{\max} \leq 0,05$ та смуги спектрів частот Δf на рівні $0,7 \cdot \Delta f_{\max}$ — $250 \leq \Delta f \leq 300$ кГц (рис. 3, в).

Згідно з алгоритмом оцінки типів руйнування, приведеним на рис. 2, для зареєстрованих сигналів АЕ обчислили значення параметра k за формулою (1): $k \leq 0,07$. Таким чином, джерела АЕ, які випромінювали зареєстровані сигнали, не становили небезпеки для ОК.

Однак, на ділянці навколо ПАЕ № 4 вузла фільтрів-брудовловлювачів I черги під час зміни тиску від 1,0 до 4,0 МПа зі швидкістю навантаження 0,05 МПа/хв зареєстровано 48 сигналів АЕ, які згідно класифікації [10] належать до II класу (активне джерело).

На рис. 4 представлено порядок розташування ПАЕ двох вимірювальних АЕ-систем SKOP-8M на технологічній схемі вузла фільтрів-брудовловлювачів I черги, де обведено фільтр № 1 та область, з якої було зареєстровано сигнали АЕ II класу активності. Відстані між ПАЕ (у метрах) у досліджуваному вузлі НПС: 1-2—1,5; 2-3 — 2,6; 3-4—3; 4-5—1,5; 6-7—1,5; 1'-2' —1,5; 3'-4' —1,5; 4'-5' —2,6 ;5'- 6'— 2,5; 6'-7' —1,5.

На рис. 5 показано характерний вид сигналів АЕ. Зазначимо, що ці сигнали на відміну від по-

передніх мали суттєво вищі значення амплітуд (до 4 мВ) (рис. 5, а) та вузькі спектри домінуючих частот (рис. 5, б). Проаналізувавши дані сигнали АЕ за допомогою вейвлет-перетворення (рис. 5, в), отримали: 1) діапазон значень максимальних вейвлет-коефіцієнтів $0,07 \leq WT_{\max} \leq 0,16$; 2) ши-

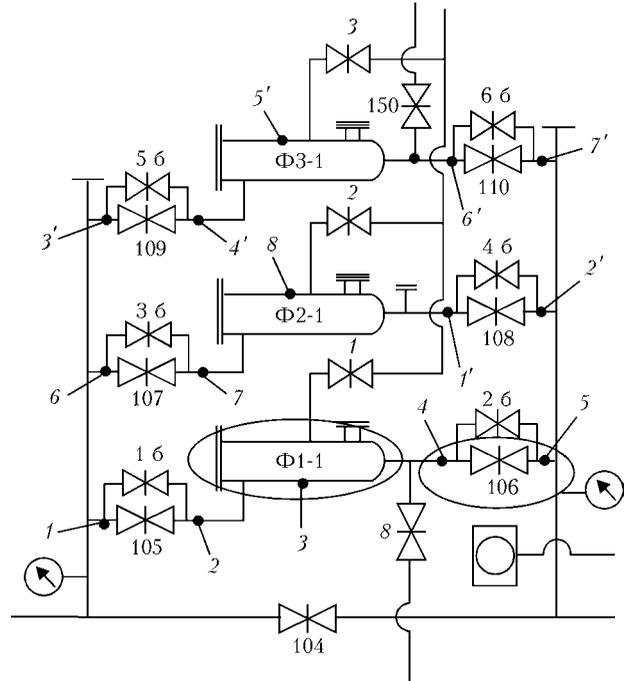


Рис. 4 Схема розташування ПАЕ (точки 1, 2, ..., 8 — ПАЕ SKOP-8M, № 1; 1', 2', ..., 8' — ПАЕ SKOP-8M, № 2)

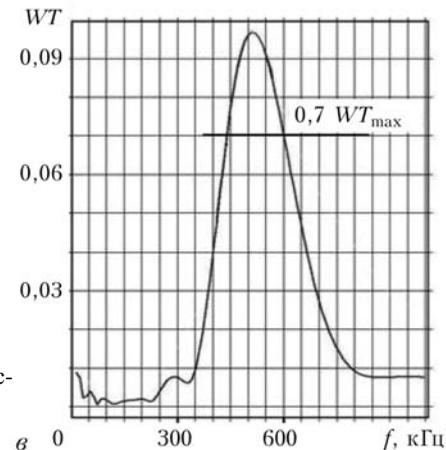
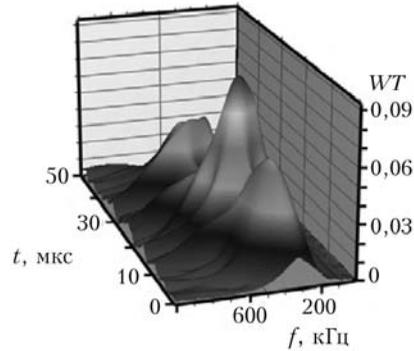
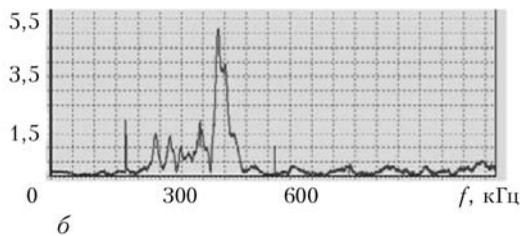
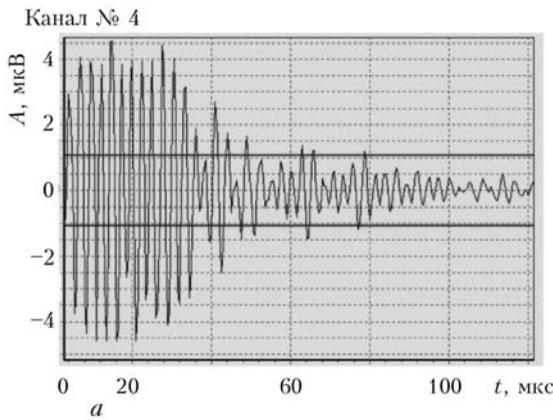


Рис. 5. Хвильове відображення (а); спектральні характеристики (б) та ВП (в) сигналу АЕ від активного джерела



рина смуги спектрів частот Δf на рівні $0,7 \cdot \Delta f_{\max}$ — $150 \leq \Delta f \leq 250$ кГц; 3) діапазон значень параметра $0,1 \leq k \leq 0,3$.

За таких високих значень критеріального параметра за алгоритмом оцінки крихкого руйнування та методики АЕ-діагностування встановлено необхідність додаткових обстежень досліджуваної ділянки іншими методами НК на предмет виявлення та оцінки розмірів тріщиноподібних дефектів. Після проведення АЕ-локації джерела та додаткової перевірки визначено місце генерування сигналів АЕ і виявлено, що вони спричинені вібрацією клапана закриття всередині засувки № 106 (див. рис. 4).

Висновки

Застосування критерію оцінки типів руйнування конструкційних матеріалів за параметрами вейвлет-перетворення сигналів АЕ під час діагностування обладнання нафтопомпувальної станції дало змогу виявити сигнали двох типів: 1) сигнали АЕ, що характеризували в'язке руйнування ($k \leq 0,07$) з низькими амплітудами, тому їх джерела не становили небезпеки для ОК; 2) сигнали АЕ з суттєво вищими амплітудами, для яких $0,1 \leq k \leq 0,3$, що відповідає крихкому руйнуванню. Додаткова перевірка підтвердила наявність несправності у клапані закриття, що дозволило її успішно усунути.

Таким чином, підсумки виконаного АЕ-діагностування обладнання нафтопомпувальної станції підтвердили ефективність запропонованої нами методики та засобів АЕ-діагностування.

Предложена методика технического диагностирования оборудования нефтеперекачивающих станций по амплитудно-частотным характеристикам сигналов акустической эмиссии и параметров их вейвлет-преобразования. Разработанная методика применена во время планового обследования нефтеперекачивающей станции «Чиживка» филиала «Магистральные нефтепроводы «Дружба» ОАО «Укртранснефть».

1. Антипов В. Н., Смирнов А. Ю. Основные требования промышленной безопасности для магистральных трубопроводов / Под ред. А. И. Владимиров, В. Я. Кершенбаума. — М.: Нац. ин-т нефти и газа, 2008. — 127 с.
2. Авария на нефтепроводе «Дружба» — мифы и реальность: мнение эксперта МСОЭС // ИА REGNUM. — Режим доступа: URL: <http://www.reg.um.ru/news/691160.html>.
3. Авария нефтепровода на Закарпатье сделала жизнь людей невыносимой // UA Reporter. — Режим доступа: URL: <http://ua-reporter.com/novosti/46582>.
4. Нафтова катастрофа у Мексиканській затоці стала найбільшою за історію США // ТСН. Новини. — Режим доступа: URL: <http://tsn.ua/svit/naftova-katastrofa-u-meksikanskiy-zatoci-stala-naybilshoyu-za-istoriyu-ssha.html>.

5. Статистика России и США. Особенности ремонта магистральных трубопроводов / А. П. Куляшов, Ю. И. Молев, А. М. Тютнев, В. А. Шапкин. — Режим доступа: URL: http://www.rusnauka.com/13_NPT_2008/Stroitelstvo/30160.doc.htm.
6. Андрусак А. В. Аналіз і причини відмов на нафтопроводі та фактори, які впливають на їх експлуатацію // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. — 2008. — № 4. — С. 83–85.
7. Бабаджанова О. Ф., Павлюк Ю. Е., Сукач Ю. Г. Пожежонебезпечні аварійні виливи нафти з лінійної частини магістрального нафтопроводу // Пожежна безпека. — 2010. — № 16. — С. 27–34.
8. Причини та механізм локальної корозії промислових нафтопроводів / В. Ю. Чернов, В. Д. Макаренко, Є. І. Крижанівський, Л. С. Шлапак // Фіз.-хім. механіка матеріалів. — 2002. — № 5. — С. 97–102.
9. Гумеров А. Г., Гумеров Р. С., Акбердин А. М. Диагностика оборудования нефтеперекачивающих станций. — М.: Недра, 2003. — 346 с.
10. Назарчук З. Т., Скальський В. Р. Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій: наук.-техн. пос.: у 3 т. — Київ: Наук. думка, 2009. — 878 с.
11. Особливості корозії та корозійно-механічного руйнування тривало експлуатованих сталей магістральних трубопроводів / О. І. Звірко, З. В. Слободян, О. Т. Циркульник та ін. // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. — 2007. — № 2. — С. 81–86.
12. Skalsky V. R., Lyasota I. M. Estimation of the heat-affected zone for the electron-beam welding of plates // Materials sci. — 2010. — 46, № 1. — P. 115–123.
13. Зорин Н. Е. Факторы, влияющие на коррозионно-механические характеристики трубных сталей в процессе длительной эксплуатации // Магистральные и промышленные трубопроводы: проектирование, строительство, эксплуатация и ремонт. — 2008. — Вып. 1. — С. 43–47.
14. Crack detection in pressure piping by acoustic emission / P. H. Hutton, R. N. Ord, H. N. Pedersen, J. C. Spanner / In: Nuclear Safety Quarterly Report — July, August, September, October, 1967 for Nuclear Safety Branch of USAEC Division of Reactor Development and Technology. BNWL-754. — Battelle-Northwest, Richland, Washington. — June 1968. — P. 3.1–3.13.
15. Mirabile M. Acoustic emission energy and mechanisms of plastic deformation and fracture // Nondestructive testing. — 1975. — 8, № 2. — P. 77–85.
16. Gerberich W., Atteridge D. G., Lessar J. F. An acoustic emission investigation of microscopic ductile fracture // Metallurgical Transactions. — 1975. — A6, № 4. — P. 797–801.
17. Теоретические концепции метода акустической эмиссии в исследовании процессов разрушения / А. Е. Андрейкив, Н. В. Лысак, О. Н. Сергиенко, В. Р. Скальський / Препр. АН УССР. Физ.-мех. ин-т; № 137. — Львов, 1987. — 49 с.
18. Скальський В. Р., Станкевич О. М. Використання вейвлет-перетворення сигналів акустичної емісії для визначення особливостей крихкого руйнування скла // Міжвуз. зб. «Інженерна механіка». — Луцьк, 2011. — Вып. 33. — С. 213–219.
19. Діагностування механізмів руйнування сталі 38ХНЗМФА за вейвлет-перетворенням сигналів акустичної емісії / В. Р. Скальський, Л. Р. Ботвіна, О. М. Станкевич та ін. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2011. — № 3. — С. 12–17.
20. Укртранснафта. Режим доступа: URL: <http://www.ukrtansnafta.com/ua/>.
21. Яковлев А. Н. Введение в вейвлет-преобразования: Уч. пос. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. — 104 с.
22. Vallen Systeme: The Acoustic Emission Company. — Access Mode: URL: <http://www.vallen.de>.

Надійшла до редакції
30.03.2012



БЕЗКОНТАКТНА СИСТЕМА ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ДЕФЕКТОСКОПА

С. М. МАЄВСЬКИЙ, д-р техн. наук, К. М. СЕРИЙ, канд. техн. наук (НТУУ «Київський політехнічний інститут»)

Запропоновано автоматизувати процес протоколювання результатів неруйнівного контролю (усунення суб'єктивності контролю) шляхом автоматичної просторової координатної реєстрації у комп'ютерній пам'яті результатів, отриманих при виконанні сканування поверхні об'єкта контролю акустичним, вихрострумовим чи магнітним вимірювальним перетворювачем відповідного дефектоскопа, яке виконується вручну дефектоскопістом. Розглянуто метод визначення просторових координат, власне вимірювального перетворювача з попереднім визначенням координат двох точкових збудників УЗ коливань (40 кГц) на його осі, шляхом вимірювання довжин шляхів розповсюдження цих коливань до трьох приймачів, розташованих на кінцях бази вимірювань.

It is proposed to automate the process of documenting NDT results (elimination of testing subjectivity) by automatic 3d coordinate recording in the computer memory of the results obtained during scanning of the tested object surface by acoustic, eddy current, or magnetic measuring converter of the respective flaw detector, which is done manually by flaw detection inspector. A method is considered to determine the 3d coordinates of the measuring converter proper with preliminary determination of the coordinates of two point sources of ultrasonic oscillations (40 Hz) on its axis, by measuring the lengths of propagation paths of these oscillations up to three receivers located at the end of measurement base.

Сьогодні у вік тотальної автоматизації найскладніших технологічних процесів все ще використовується неавтоматизований процес неруйнівного контролю (НК) елементів конструкцій за допомогою праці дефектоскопіста, який вручну сканує вимірювальним перетворювачем дефектоскопа поверхню об'єкта контролю (ОК), оцінює результат контролю та складає акт про виконаний контроль. На жаль така ситуація буде існувати ще довго, тому що замінити ручний контроль автоматичними системами контролю в багатьох галузях ще неможливо через складні поверхні ОК.

Не дивлячись на песимістичний висновок сьогодні потрібно і можливо вирішити проблему усунення суб'єктивності виконаного дефектоскопістом контролю шляхом організації автоматичного координатного запису процесу контролю. Для цього необхідно вирішити дві задачі: кодування з заданою швидкістю інформативного параметра вихідного сигналу дефектоскопу, як правило — амплітуди сигналу, та визначення з такою ж швидкістю цифрових значень координат сканування поверхні ОК вимірювальним перетворювачем дефектоскопа.

Перша з проблем вирішується досить просто за допомогою невеликого додаткового блоку з АЦП та мікроконтролером. Основна проблема інформатизації дефектоскопа полягає у відтворенні системи, яка б визначала своєю системою відліків координати положення вимірювального перетворювача у процесі сканування ним поверхні ОК.

Розробники дефектоскопічної апаратури відомих у світі фірм вирішують згадану вище проблему, розробляючи різноманітні механічні засоби,

які, маючи рухомі та поворотні частини шляхом вимірювання кутів повороту та довжини лінійних переміщень, дають можливість визначати полярні та прямокутні координати прикріплених до них вимірювальних перетворювачів у процесі ручного сканування. Нерухома платформа таких засобів кріпиться до поверхні ОК, як правило, пневматичним або магнітним способом [1, 2].

Точність визначення координат такими системами недостатня і залежить від розмірів зони контролю. Проте це навіть не головне. Головним є те, що подібні системи реально існують тільки для випадку контролю плоских об'єктів. До того ж ускладнюється робота дефектоскопіста, який вимушений рухати не тільки вимірювальним перетворювачем, постійно контролюючи його нормальне до поверхні ОК положення та контролювати відповідність інших технологічних вимог: наявність контактної рідини на поверхні ОК для акустичного контролю, відсутність додаткового зазору між вимірювальним перетворювачем та поверхнею ОК для вихрострумового контролю тощо.

Виходячи зі сказаного вище, зрозумілі вимоги до систем визначення координат, які б не мали згаданих недоліків. Така система повинна незалежно від дефектоскопіста дистанційно та автоматично реалізовувати процес визначення просторових координат положення вимірювального перетворювача під час виконання дефектоскопістом сканування цим перетворювачем навіть складної трьохмірної поверхні ОК.

Для вирішення даної задачі можемо скористатися відомими методами навігаційної техніки, трансформували ці методи до відносно невеликих (до 1 м) розмірів бази вимірювання з такими ж відстанями до вимірювального перетворювача.



З розглянутих в роботі [3] методів реально можемо використати два: метод, оснований на вимірюваннях відстаней до точок з встановленими координатами, у даному випадку — точок на кінцях бази вимірювання, та триангуляційний метод, який вимагає визначення кутових напрямків на власне вимірювальний перетворювач відносно лінії бази вимірювань.

Від традиційного методу радіонавігації, не дивлячись на привабливу перспективу вимірювання відстаней шляхом визначення часових затримок високочастотних електромагнітних коливань вимірюванням фазових зсувів, зразу відмовимось, тому що не зможемо отримати необхідної точності за рахунок реверберації та невизначеної швидкості розповсюдження коливань в умовах нестационарного впливу провідної поверхні ОК.

Для вимірювання порівняно невеликих відстаней є можливість використати УЗ низькочастотні коливання, наприклад 40 кГц, для генерування яких можемо використати стандартні перетворювачі типу АП-1 [4].

Нами розроблена схема вимірювань необхідних відстаней, розрахована на визначення трьохмірних координат власне вимірювального перетворювача дефектоскопа незалежно від його типу та методу неруйнівного контролю, що в ньому реалізований [5]. Згідно цієї схеми вимірювальний перетворювач дефектоскопа має бути конструктивно дороблений. Така доробка полягає у подовженні корпусу перетворювача вздовж його осі з метою розміщення двох точкових збудників УЗ коливань на фіксованій відстані ΔL між ними та на відстані крайнього з них до власне вимірювального перетворювача, рівній L_0 . Ці відстані можуть бути такими: $\Delta L = 50$ мм, $L_0 = 150$ мм. Точкові збудники розташовуються перпендикулярно до твірної подовженого корпусу та орієнтовані у напрямку приймачів УЗ коливань.

Принцип визначення координат окремих точок на осі вимірювального перетворювача (збудників УЗ коливань) представлений на рис. 1. Спочатку розглянемо послідовність дій, направлених на визначення координат точки A . Збуджене у цій точці УЗ коливання частотою 40 кГц прямолінійно розповсюджується широкою діаграмою направленості та приймається приймачами 1–3. При цьому часові затримки коливань відповідно дорівнюють: τ_{A1} , τ_{A2} та τ_{A3} , а пройдені коливаннями відстані дорівнюють: $l_{A1} = V\tau_{A1}$; $l_{A2} = V\tau_{A2}$; $l_{A3} = V\tau_{A3}$, де V — швидкість розповсюдження коливань у повітрі.

Для визначення координати точки A опустимо з цієї точки перпендикуляри P_{1A} , P_{2A} на прямі на кінцях бази вимірювань B , на яких на висоті H розміщені приймачі 1 і 2, а на висоті $2H$ розміщений приймач 3. Зрозуміло, що відстань до точок пересічення перпендикулярів з лініями

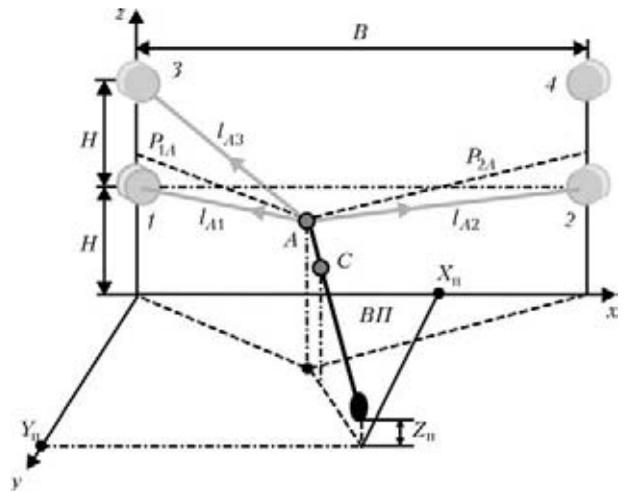


Рис. 1. Схема визначення координат вимірювального перетворювача дефектоскопа за координатами двох УЗ точкових збудників коливань: 1–3 — приймачі УЗ коливань; 4, А, С — точкові збудники УЗ коливань; ВП — вимірювальний перетворювач; B — база вимірювань; P_{1A} , P_{2A} — перпендикуляри від збудника УЗ коливань A до границі бази вимірювання; l_{A1} – l_{A3} , 3 — відстані від збудника УЗ коливань A до відповідних приймачів 1–3; X_n , Y_n , Z_n — координати вимірювального перетворювача

розміщення приймачів коливань від бази вимірювань є координата Z_A .

Довжини згаданих перпендикулярів з урахуванням відстаней l_{A1} , l_{A2} , l_{A3} становлять:

$$P_{1A}^2 = l_{A3}^2 - (2H - Z_A)^2, \quad (1)$$

$$P_{1A}^2 = l_{A1}^2 - (Z_A - H)^2, \quad (2)$$

$$P_{2A}^2 = l_{A2}^2 - (Z_A - H)^2. \quad (3)$$

Прирівнявши праві частини рівнянь (1) і (2), знаходимо значення координати Z_A :

$$Z_A = \frac{l_{A1}^2 - l_{A3}^2 + 3H^2}{2H}. \quad (4)$$

Підставимо (4) в (1) та (3), отримаємо значення перпендикулярів P_{1A} та P_{2A} :

$$P_{1A} = \sqrt{l_{A1}^2 - \left(\frac{l_{A1}^2 - l_{A3}^2 + H^2}{2H}\right)^2}, \quad (5)$$

$$P_{1A} = \sqrt{l_{A2}^2 - \left(\frac{l_{A1}^2 - l_{A3}^2 + H^2}{2H}\right)^2}. \quad (6)$$

Розглядаючи проекції P_{1A} , P_{2A} на площині Oxy , знайдемо значення ординати та абсциси збудника коливань, розміщеного у точці A . Для цього складемо таку систему рівнянь:

$$Y_A = P_{1A}^2 - X_A^2, \quad (7)$$

$$Y_A^2 = P_{2A}^2 - (B - X_A)^2.$$

Виходячи з рівнянь (7) з урахуванням виразів (5), (6), знаходимо абсцису і ординату точки A :



$$X_A = \frac{l_{A1}^2 - l_{A2}^2 + B^2}{2B}, \quad (8)$$

$$Y_A = \sqrt{\left[l_{A1}^2 - \left(\frac{l_{A1}^2 - l_{A3}^2 + H^2}{2H} \right)^2 \right] - \left(\frac{l_{A1}^2 - l_{A2}^2 + B^2}{2B} \right)^2}. \quad (9)$$

Аналогічно, вимірюючи довжини $l_{C1}-l_{C3}$, визначасмо координати точкового збудника УЗ коливальних С:

$$X_C = \frac{l_{C1}^2 - l_{C2}^2 + B^2}{2B}, \quad (10)$$

$$Y_C = \sqrt{\left[l_{C1}^2 - \left(\frac{l_{C1}^2 - l_{C3}^2 + H^2}{2H} \right)^2 \right] - \left(\frac{l_{C1}^2 - l_{C2}^2 + B^2}{2B} \right)^2}, \quad (11)$$

$$Z_C = \frac{l_{C1}^2 - l_{C3}^2 + 3H}{2H}. \quad (12)$$

Визначення координат збудників УЗ коливальних А і С виконуємо послідовно в часі і довжина циклу послідовно-періодичних збуджень коливальних цими збудниками може дорівнювати 0,05 с (0,025 с на виконання збудження коливальних і вимірювань їх часових затримок). При цьому допускаємо динамічну похибку, рівну 1 мм при швидкості сканування 20 мм/с.

Визначивши трьохмірні координати двох точок А і С на осі вимірювального перетворювача та враховуючи відстані між цими точками вздовж осі корпусу вимірювального перетворювача та

відстань до власне перетворювача, можемо визначити його координати як третьої точки на прямій:

$$X_{II} = \frac{L_0 X_C - (L_0 - \Delta L) X_A}{\Delta L} = \frac{L_0 [(l_{C1}^2 - l_{C2}^2) - (l_{A1}^2 - l_{A2}^2)] + \Delta L (l_{A1}^2 - l_{A2}^2 + B^2)}{2B \Delta L}, \quad (13)$$

$$Y_{II} = \frac{L_0 Y_C - (L_0 - \Delta L) Y_A}{\Delta L} = \frac{L_0 \sqrt{2BH l_{C1}^2 - B(l_{C1}^2 - l_{C3}^2 + H^2)^2 - H(l_{C1}^2 - l_{C2}^2 + B^2)} - \dots}{\Delta L \sqrt{2BH}} \dots \frac{- (L_0 - \Delta L) \sqrt{2BH l_{A1}^2 - B(l_{A1}^2 - l_{A3}^2 + H^2)^2 - H(l_{A1}^2 - l_{A2}^2 + B^2)}}{\dots}, \quad (14)$$

$$Z_{II} = \frac{L_0 Z_C - (L_0 - \Delta L) Z_A}{\Delta L} = \frac{L_0 [(l_{C1}^2 - l_{C3}^2) - (l_{A1}^2 - l_{A3}^2)] + \Delta L (l_{A1}^2 - l_{A3}^2 + 3H)}{2H}. \quad (15)$$

Зупинимося на особливостях практичної реалізації системи визначення координат вимірювального перетворювача та аналізі точності цієї системи. Функціональна схема системи визначення координат показана на рис. 2.

Згідно цієї схеми автоматизація всіх процесів виконана за допомогою мікроконтролера, який програмується на виконання необхідних операцій, з вимірювання довжин $l_{A1}-l_{A3}$ та $l_{C1}-l_{C3}$ і подальшої обробки отриманої інформації з метою визначення координат вимірювального перетворювача X_{II}, Y_{II}, Z_{II} .

Вимірювання вказаних вище відстаней виконується шляхом кодування часового інтервалу (імпульсу напруги), початком якого є момент збудження УЗ коливальних відповідним збудником, а кінцем — момент появи імпульса на виході компаратора напруг при підключенні на його вхід попередньо підсиленого та детектованого сигналу, прийнятого відповідним приймачем. Цей імпульс компаратора фіксує момент приходу УЗ коливальних на приймач.

Часовий інтервал (імпульс напруги) формується за допомогою RS-тригера. Код кожної довжини шляху розповсюдження коливальних формується лічильником імпульсів на виході схеми співпадання, яка на час існування інтервалу пропускає на вхід лічильника імпульси генератору мікроконтролера (10 мГц). Код лічильника утримується на регістрі пам'яті до моменту його зчитування у відповідний

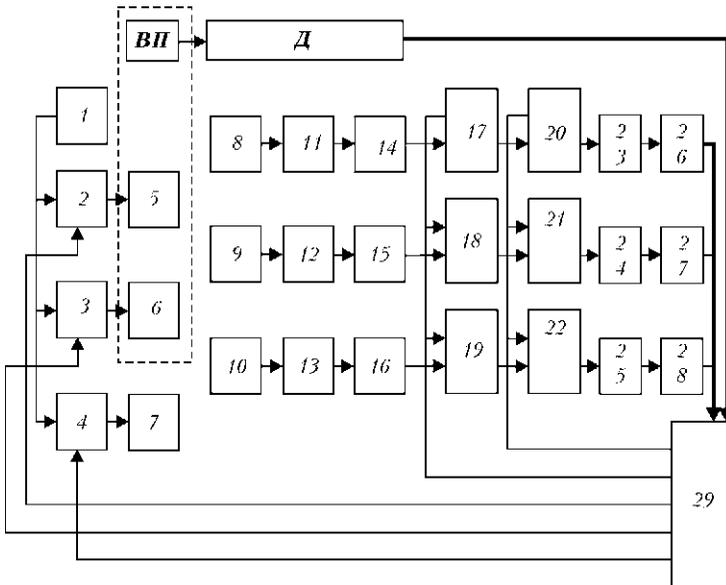


Рис. 2. Функціональна схема системи визначення просторових координат: 1 — джерело живлення; 2-4 — електронні ключі; 5-7 — збудники УЗ (40 кГц) коливальних; 8-10 — приймачі коливальних; 11-13 — аналогові тракти, кожен у складі: підсилювача, амплітудного детектора; 14-16 — амплітудні компаратори; 17-19 — RS-тригери; 20-22 — схеми І; 23-25 — лічильники імпульсів; 26-28 — регістри пам'яті; 29 — мікроконтролер; Д — дефектоскоп



порт мікроконтролера згідно програми роботи мікроконтролеру.

Точність визначення координат при використанні вимірювань відстаней шляхом вимірювання затримок УЗ коливань залежить в першу чергу від швидкості розповсюдження коливань та від впливу руху повітряних мас на визначення часу їх затримок.

Відомо, що фазова швидкість розповсюдження звукових коливань, а вибрана нами частота 40 кГц лежить недалеко від границь звукових частот, залежить від температури повітря і визначається за таким рівнянням [6]:

$$V(t) = (331,6 + 0,6t), \text{ м/с}, \quad (16)$$

де t — температура, °С.

При температурі 25°С швидкість розповсюдження коливань 346,6 м/с, а при зміні температури на ± 20 °С величина зміни швидкості становить ± 12 м/с ($\pm 3,46$ %). Усунення такого джерела похибки можемо досягти введенням до складу системи вимірювача фактичної швидкості ультразвуку за допомогою додаткового збудника коливань 4 (рис. 1), 7 (рис. 2) з прийомом його коливань одним з приймачів, наприклад, 3 (рис. 1). Відстань, яку проходять коливання додаткового збудника, відповідає довжині бази вимірювань B . Вимірюючи час запізнення цих коливань τ_B , знаходимо фактичну фазову швидкість розповсюдження коливань:

$$V_{\phi} = \frac{B}{\tau_B}. \quad (17)$$

Це значення швидкості використовуємо для визначення довжин шляхів проходження УЗ коливаннями від кожного зі збудників коливань до кожного з приймачів цих коливань.

Інша методична похибка, що виникає за рахунок впливу руху повітряних мас у зоні вимірювання, на жаль не може бути компенсована. Цей рух повітряної маси приводить до зміни швидкості розповсюдження УЗ коливань та зміни траєкторії їх розповсюдження. В обох випадках рух повітряної маси приводить до похибок величин часових затримок коливань і, таким чином, до похибки визначення відстаней між збуджувачами коливань та приймачами цих коливань. При швидкості руху повітря до 1 м/с максимально можлива похибка не перевищує 3 мм при максимальній відстані до вимірювального перетворювача відносно кінців бази вимірювань (1 м). Для зменшення впливу руху повітря на результат визначення координат перетворювача у польових умовах слід захищати місце виконання контролю від вітру за допомогою звичайних наметів.

Висновки

Розглянутий в статті метод визначення просторових координат вимірювального перетворювача дефектоскопа незалежно від методу неруйнівного контролю, що реалізований у даному дефектоскопі, дозволяє формувати формуляр з відображення картини виконаного НК контролю об'єкта у просторових координатах положення вимірювального перетворювача дефектоскопа та відображення місць виявлених дефектів.

Отримане незалежно від дефектоскопіста відображення виконаного контролю у координатах сканування поверхні об'єкта вимірювальним перетворювачем є об'єктивним документом про виконаний контроль. Наявність такого документу дозволяє оцінювати якість виконаного НК та забезпечує об'єктивне виконання моніторингу даного об'єкта.

Данная работа направлена на устранения субъективности результата контроля с помощью дефектоскопов путем независимого от дефектоскописта автоматического дистанционного определения пространственных координат преобразователя дефектоскопа в процессе ручного сканирования им поверхности объекта контроля и осуществления записи этих координат вместе с оцифрованным с помощью АЦП значением выходного сигнала дефектоскопа в цифровую память.

Метод определения пространственных координат измерительного преобразователя дефектоскопа предусматривает предварительное периодическое с периодом не более 0,05 с измерение расстояний между каждой из двух точек на оси преобразователя (излучателей УЗ (40 кГц) колебаний) и тремя приемниками этих колебаний, установленных на общей базе на фиксированных расстояниях. Пространственные координаты самого измерительного преобразователя определяются как координаты третьей точки на оси преобразователя.

1. Сухоруков В. В., Ермолов И. Н., Алешин Н. П., Потанов А. И. Неразрушающий контроль. Кн. 5. Интроскопия и организация контроля. — М.: Высш. шк., 1993. — С. 9–19.
2. Гурин С. А., Рубцов В. Д., Фабрик М. А. Сканеры-дефектоскопы // В мире неразруш. контроля. — 2004. — № 2(24). — С. 31–63.
3. Кинкулькин И. Е. и др. Фазовый метод определения координат. — М.: Сов.радио, 1979. — С. 5–19.
4. Горбатов А. А., Рудашиевский Г. Е. Акустические методы измерения расстояний в воздушной среде. — М.: Энергоиздат, 1981. — С. 115–201.
5. Масвський С. М., Серий К. М. Системи дистанційного визначення просторового положення вимірювального перетворювача дефектоскопу у процесі контролю // Методи та прилади контролю якості. — 2002. — № 9. — С. 14–18.
6. Кухлинг Х. Справочник по физике. — М.: Мир, 1982. — С. 254.

Надійшла до редакції
10.02.2012



ОСОБЕННОСТИ КОНТРОЛЯ АЭ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ЦИКЛИЧЕСКОМ КОНСОЛЬНОМ ИЗГИБЕ ОБРАЗЦОВ

Ю. Г. БЕЗЫМЯННЫЙ, д-р техн. наук (Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины), **Д. В. ГАЛАНЕНКО**, инж. (ООО «Промприлад»), **Л. О. ТЕСЛЕНКО**, инж. (Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины)

Проведен анализ особенностей использования системы для исследования и контроля методом акустической эмиссии процесса накопления многоциклового усталостного повреждения материала при высокоскоростном циклическом консольном изгибе образцов. Описаны принципы оптимизации и экспериментально получены параметры акустического тракта системы с целью повышения его помехоустойчивости и информативности. Показано, что параметры сигналов АЭ хорошо отображают процессы скорости развития и накопления усталостных повреждений как в металлических, так и в композитных материалах. Исследованы закономерности появления сигналов АЭ и изменение их спектрального состава, обусловленные режимом нагружения и стадией разрушения образца, а также выявлены особенности этих закономерностей для материалов Д16Т, Ст3, стеклотекстолита, отражающие не-изменность процесса усталостной поврежденности.

Analysis of the features of system application for investigation and monitoring by acoustic emission method of the process of high-cycle fatigue damage accumulation in the material at high-speed cyclic bending of samples supported in cantilever was performed. Principles of optimization were described, and parameters of system acoustic circuit were experimentally retrofitted in order to improve its noise resistance and informativity. It is shown that parameters of AE signals accurately represent the process of development and accumulation of fatigue damage both in metallic and in composite materials. Regularities of emergence of AE signals and variation of their spectral composition, which were due to the loading mode and stage of sample failure, were studied, and special features of these regularities were established for such materials as D16T, St3, and glass fiber plastic, which reveal the non-uniformity of fatigue damage process.

Одно из направлений расширения области применения метода АЭ связано с развитием способов выделения сигналов АЭ в условиях шумовых помех [1]. В этом плане заслуживает внимания проблема контроля состояния материала при усталостных испытаниях на высоких частотах нагружения [2].

Высокочастотные испытания дают единственную возможность получить характеристики усталости материала на больших базах нагружения в реальном масштабе времени [3]. При многоциклового усталости материала накопление в нем повреждений начинается задолго до появления макротрещины [4]. Процесс накопления усталостной поврежденности имеет общие закономерности, однако в силу микронеоднородностей структуры даже для одинаковых материалов он индивидуален для каждого образца [5]. Поэтому имеет большой научный и практический интерес создание и развитие методов получения информации о разрушении материала начиная с ранних стадий зарождения усталостной поврежденности непосредственно в процессе деформирования образца с последующим использованием этой информации для диагностики состояния реальных конструкций по результатам НК изделия.

Поскольку каждый акт усталостного повреждения связан с микропластической деформацией элементарного объема материала, он сопровождается сигналами АЭ [6]. Поэтому метод АЭ может быть использован для получения информации об

усталостном разрушении при условии выделения сигналов АЭ на фоне неинформативных шумов [7]. Проблема заключается в том, что циклические испытания образцов на высоких частотах нагружения проводят в резонансном режиме колебаний, когда в образце создают мощное акустическое поле, являющееся источником шумовой помехи [2].

Первые попытки решения сформулированной проблемы были предприняты в 1980-х гг. прошлого столетия [8–10]. Ее сложность, а также несовершенство АЭ аппаратуры [11] и недостаточный уровень понимания взаимосвязи параметров АЭ с кинетикой микроразрушения твердых тел [12] не позволили разработать методики надежного выявления сигналов АЭ на ранних стадиях поврежденности материала и, тем более, методов ее диагностики.

Развитие АЭ-техники позволило вернуться к этой проблеме на новом уровне. В последнее время нами был проделан цикл работ [13–15] по исследованию возможности надежного обнаружения сигналов АЭ, начиная с ранних стадий усталостной поврежденности, в процессе высокоскоростного циклического деформирования в мощном акустическом поле консольно закрепленных образцов листовых материалов. В результате предложена система для выявления сигналов АЭ при резонансном нагружении консольно закрепленного образца из листового материала [16] и показаны возможности использования этой системы для получения сигналов АЭ у материалов,

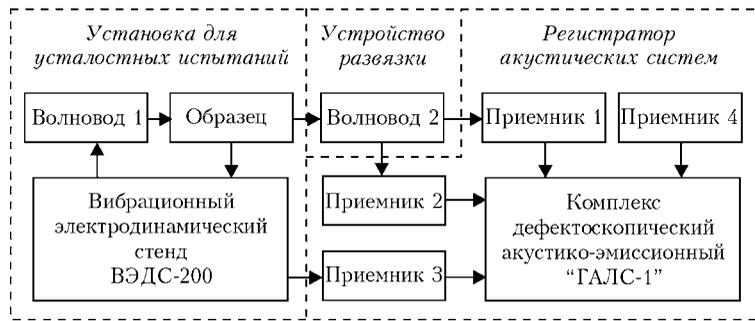


Рис. 1. Структурная схема системы для измерения параметров АЭ листовых материалов в процессе резонансного нагружения образцов

имеющих характерные особенности накопления усталостной поврежденности [17].

Целью настоящей работы является развитие предыдущих работ по возможностям применения метода АЭ для исследований и контроля накопления усталостной поврежденности консолюно закрепленных образцов листовых материалов при их резонансном нагружении. Основное внимание уделено оптимизации акустического тракта системы для повышения его помехоустойчивости и информативности, а также исследованию закономерностей появления сигналов АЭ и изменения их спектрального состава, обусловленных режимом нагружения и стадией разрушения образца, в материалах с характерными особенностями развития усталостной поврежденности.

Описание системы, ее настроек и принципов оптимизации акустического тракта. Структурная схема используемого в настоящей работе варианта системы для измерения параметров АЭ листовых материалов в процессе резонансного нагружения образцов показана на рис. 1, а внешний вид акустического тракта — на рис. 2.

Усталостные испытания проводят в режиме вынужденных симметричных изгибных резонансных колебаний образца материала по методикам, описанным в работе [3]. Так, с помощью вибрационного электродинамического стенда (ВЭДС) возбуждают продольные упругие колебания, частоту и амплитуду которых можно менять и измерять в широких пределах. *Волновод 1* служит для увеличения амплитуды этих колебаний и трансформации их в изгибные колебания образца на одной из частот резонанса. Консолюно закрепленный образец испытывали используя первую или вторую собственную форму изгибных колебаний. При этом зона высоких напряжений, в которой локализуется накопление усталостных повреждений материала, мала по сравнению с размером образца, причем, при использовании второй формы колебаний объем этой зоны почти на порядок меньше, чем на первой. В жестко закрепленном образце постоянного сечения она находится вблизи заделки образца на первой форме колебаний, и на относительно расстоянии от за-

делки, равном 0,53 от длины образца, — на второй. В рабочий резонансный режим образец вводят путем подстройки частоты и выбора необходимой амплитуды колебаний. В процессе испытаний поддерживают постоянной амплитуду колебаний образца и, при необходимости, подстраивают частоту резонанса.

Волновод 2 предназначен для передачи от образца к датчикам сигналов АЭ, не нарушая условий усталостных испытаний и не пропуская на эти дат-

чики мощное испытательное акустическое поле. Развязка регистратора АЭ сигналов и установки для усталостных испытаний осуществляется путем выбора гибкости волновода и массы струбицины для крепления к нему датчиков таким образом, чтобы снизить резонансную частоту этой конструкции по сравнению с частотой резонанса образца [14]. Выбор волновода с учетом указанных требований исследован в настоящей работе экспериментально. Проведенный нами теоретический анализ [13] показал, что в зависимости от особенностей источника АЭ изменяются спектральные и временные характеристики сигналов, прошедших через волноводный слой. Этот вопрос также исследован в настоящей работе экспериментально.

Регистратор акустических сигналов построен на основе многоканального дефектоскопического акустико-эмиссионного комплекса «ГАЛС-1». К четырем его каналам подключены пьезоэлектрические преобразователи, предназначенные для приема и преобразования акустических сигналов. На *Приемники 1* и *2* поступают сигналы с *Волновода 2*. Анализ состава поступающих с волновода сигналов [15] показал, что, в зависимости

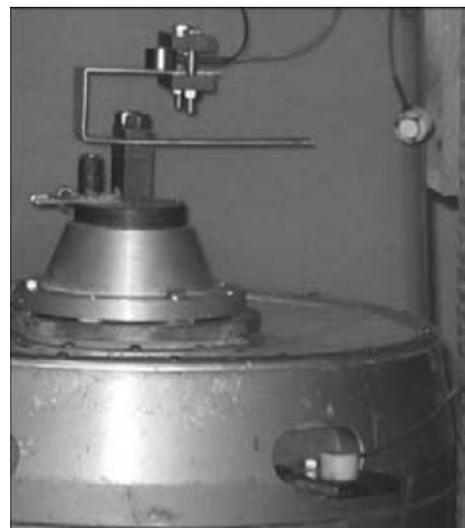


Рис. 2. Внешний вид акустического тракта системы для измерения параметров АЭ листовых материалов в процессе резонансного нагружения образцов



от режима работы испытательной установки они могут содержать информативные сигналы АЭ, генерируемые при развитии усталостных повреждений в материале образца, и шумовые помехи различного происхождения. Для исследований особенностей спектра частот информативных сигналов АЭ выбраны два преобразователя с различными полосами пропускания: 1 — 100...800, 2 — 80...500 кГц.

Шумовые помехи можно разделить на следующие виды: в результате трения в местах сочленения элементов конструкции акустического тракта; создаваемые подвижными частями вибростенда в установленном режиме испытаний; генерируемые высшими гармониками собственных форм колебаний образца при его нагружении; возникающие при переключении или подстройке режимов испытаний; электромагнитные помехи различного происхождения. Первую помеху устраняют традиционной [3] настройкой систем крепления сочленяемых элементов, которую проводят для обеспечения высокого КПД передачи акустической энергии от вибростенда через волновод в образец. Вторые два вида шумовых помех можно устранить выбором настроек комплекса «ГАЛС-1» [18]. Настройки параметров комплекса выбирают экспериментально для установленного режима испытаний образца таким образом, чтобы во всех приемных каналах были подавлены шумовые составляющие второго и третьего вида. Используемые в настоящей работе настройки комплекса «ГАЛС-1» приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры настроек каналов комплекса «ГАЛС-1»

Параметр	Номер канала			
	1	2	3	4
Цвет отображения				
Тип преобразователя	GT300	GT200	GT200	GT300
Активность	Вкл.	Вкл.	Вкл.	Вкл.
Коэффициент основного усиления, дБ	45,0	45,0	45,0	45,0
Уровень дискриминации (порог), дБ	21,0	21,0	21,0	21,0
Режим порога	Фикс.	Фикс.	Фикс.	Фикс.
Превышение плавающего порога, дБ	20,0	20,0	20,0	20,0
Время усреднения шумов, мкс	1638	1638	1638	1638
Максимальное время нарастания, мкс	1000	1000	1000	1000
Время ожидания продолжения, мкс	100	100	100	100
Максимальная длительность, мкс	5000	5000	5000	5000
Мертвое время, мкс	5000	5000	5000	5000
Превышение, дБ	-3,0	-3,0	-3,0	-3,0
Нижняя частота фильтра, кГц	80	275	350	350
Верхняя частота фильтра, кГц	375	500	700	700

Для выявления и идентификации шумов переключения и подстройки введен преобразователь, закрепленный на корпусе электродинамического вибратора, а для выявления электромагнитных помех — преобразователь, расположенный на воздухе в месте, близком к элементам вибростенда, в которых возбуждается электромагнитное поле. Сигналы, поступающие с преобразователей на входы каналов комплекса, регистрируют в нем с возможностью последующей программной обработки. В процессе такой обработки идентифицируют и отсеивают шумовые помехи, а в информативном сигнале определяют параметры АЭ.

Отметим, что в местах контакта образца с волноводами возникают явления коррозии и электрического взаимодействия контактирующих поверхностей, которые искажают естественный процесс усталостного разрушения материала, а известные способы борьбы с ними трудоемки [3] или существенно ослабляют информативные сигналы АЭ. В то же время при больших уровнях нагружения указанные явления сопровождаются генерацией паразитных сигналов АЭ [15]. Устранение паразитной АЭ было достигнуто путем введения в образец концентратора напряжений в месте их наибольших значений. При использовании первой формы колебаний концентратор выполняли в виде двустороннего паза по ширине образца в месте окончания заделки, а на второй форме — такого же паза на расстоянии 0,53 длины образца от заделки или сквозного сверления по толщине в этом же месте.

Постановка эксперимента, его результаты и их анализ. Экспериментальная проверка, отработка и оптимизация параметров системы была проведена на образцах, представленных в табл. 2.

Для оптимизации характеристик акустической системы по критерию наиболее эффективного коэффициента передачи сигналов АЭ от образца к преобразователю были изготовлены волноводы из стали и дюралюминия различной толщины. Анализ пропускающей способности волноводов исследовали по обоим каналам с использованием имитатора Су-Нильсена. Для каждого из них проведены по пять сломов грифеля: на образце в предполагаемом месте излома, на волноводе ря-

Таблица 2. Характеристики образцов

Номер образца	Материал	Размеры образца, мм			Размеры паза, мм	
		длина	ширина	толщина	глубина	диаметр
1...6	Д16Т	100	10,0	1,0	0,2	—
7	Д16Т	121	10,9	1,4	0,3	—
8	Ст3	101	11,8	1,5	0,4	—
9	Стекло-текстолит	95	11,5	1,5	0,5	—
10	Д16Т	100	10,0	1,0	—	2,0

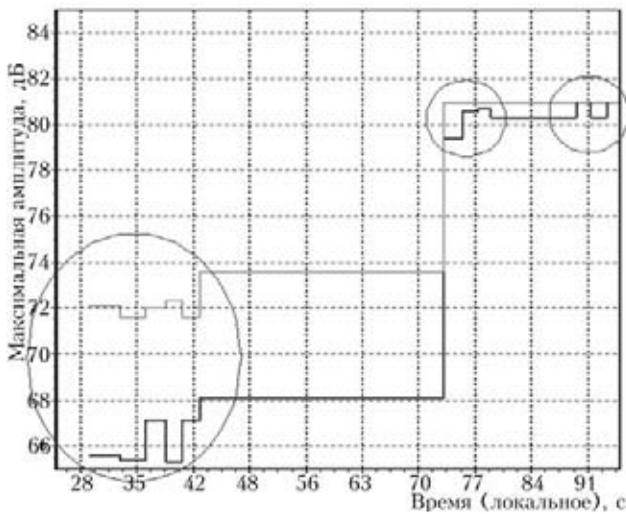


Рис. 3. Характеристики акустических трактов 1 и 2 каналов (здесь и далее на рисунках интенсивность ч/б изображения соответствует интенсивности цвета каналов в табл. 1)

дом с заделкой образца, на волноводе рядом с датчиками. Все волноводы дали хорошие результаты по передаче сигналов АЭ. На рис. 3 приведены таковые для волновода из дюралюминия толщиной 1 мм. Из рисунка видно, что чувствительность преобразователей каналов 1 и 2 приблизительно одинакова (последняя серия сигналов); затухание сигналов в волноводе пренебрежимо мало (сравнение 2- и 3-й групп сигналов); затухание, вносимое переходом сигнала из образца в волновод, составляет для канала 1 величину порядка 13...15 дБ, а для канала 2 — 8...10 дБ.

Усталостные испытания образцов проводили, используя первую (образцы 1–4) или вторую (5, 6) форму собственных колебаний образцов. В процессе испытаний амплитуду колебаний образца ступенчато увеличивали до разрушающего уровня с соответствующей подстройкой частоты резонанса. При этом регистрировали сигналы, поступающие на вход каждого преобразователя. Появление макротрещины в образце фиксировали традиционным [3] методом — по снижению амплитуды колебаний, обусловленному уменьшением резонансной частоты. Затем путем многократной подстройки резонансной частоты образец доводили до полного разрушения.

В процессе испытаний опробованы различные волноводы и установлено, что для используемых режимов нагружения дюралюминиевый волновод толщиной 1 мм обеспечивает лучшую по сравнению с другими развязку регистратора акустических сигналов и установки для усталостных испытаний не нарушая условий усталостных испытаний и не допуская влияния на эти датчики мощного испытательного акустического поля.

Для оптимизации акустического тракта системы относительно спектра сигналов АЭ в различных экспериментах были исследованы следующие полосы частот фильтров каналов 1 и 2: 80...300;

80...375; 100...400; 100...700; 250...500; 275...500; 350...500; 450...700 кГц. В результате как наиболее чувствительные к наличию сигналов АЭ на разных стадиях разрушения материала были выбраны для канала 1 полоса 80...375, для канала 2 — 275...500 кГц.

В каналах 3 и 4 уровень сигналов во время всех испытаний оставался около 0.

Образцы 7–10 (см. табл. 2) были использованы для исследования закономерностей появления сигналов АЭ, обусловленных нагружением материалов, имеющих характерные особенности усталостного разрушения. Испытания проводили, используя первую (образцы 7–9) и вторую (10) форму собственных колебаний при неизменном волноводе (дюралюминий толщиной 1 мм), настройках ГАЛС (см. табл. 1) и методике нагружения (как для образцов 1–6).

В результате обработки сигналов, поступивших в процессе испытаний по каналам 1 и 2, были рассчитаны как функция времени параметры АЭ, отображающие скорость развития (активность, скорость счета) и процесс накопления (количество сигналов, суммарный счет) повреждений в исследуемых материалах при их резонансном деформировании, а также длительность, время до достижения максимального значения, энергия, максимальная амплитуда и различные комбинации этих параметров. На рис. 4, а–7, а для каждого исследованного образца представлены зависимости скорости счета и суммарного счета 4, б–7, б от времени нагружения, которые наиболее ярко отображают процессы соответственно скорости развития и накопления поврежденности материала. Информация для обоих параметров на каждый рисунок приведена по всем каналам. Динамический диапазон изменения этих параметров в процессе испытания настолько велик, что не позволяет отобразить одновременно закономерности их изменения на всех этапах испытания. Поэтому масштаб представления выбран таким, чтобы хорошо были отображены средние значения. Крайние значения описаны словесно. Для анализа закономерностей появления сигналов АЭ, обусловленных режимом нагружения, на рис. 4, в–7, в приведены значения частоты резонанса и размаха колебаний образца.

Из рис. 4 видно, что в образце из сплава Д16Т при нагружении на первой форме собственных колебаний сигналы АЭ в канале 2 появились при установлении размаха колебаний 5 мм. В этом режиме скорость счета АЭ возросла до максимума, а затем уменьшилась. При повышении размаха до 8,5 мм наблюдался всплеск скорости счета в обоих каналах. Затем в установившемся разрушающем режиме колебаний (8,5 мм) в канале 2 ход изменения для скорости счета повторился, как на предыдущем уровне, но для больших значений,



с последующим уменьшением ее значения до приблизительно стабильной величины. В канале 1 в установившемся разрушающем режиме колебаний скорость счета возрастала дольше и достигла значительно больших значений, чем в канале 2, а затем так же долго спадала. Этот спад завершился на 720 с появлением макротрещины и нарушением установившегося режима колебаний. Начиная с 770 с образец доводили до полного разрушения путем многократного подстраивания режима нагружения в резонансный режим колебаний. Введение образца в резонанс сопровождалось развитием макротрещины и появлением соответствующих всплесков скорости счета, уровень которых существенно уступает полученным на стадии накопления микротрещин. На зависимости суммарного счета от времени нагружения (б) видно, что количество сигналов АЭ сначала было больше в канале 1, а затем, в процессе нагружения в установившемся разрушающем режиме, — в канале 2.

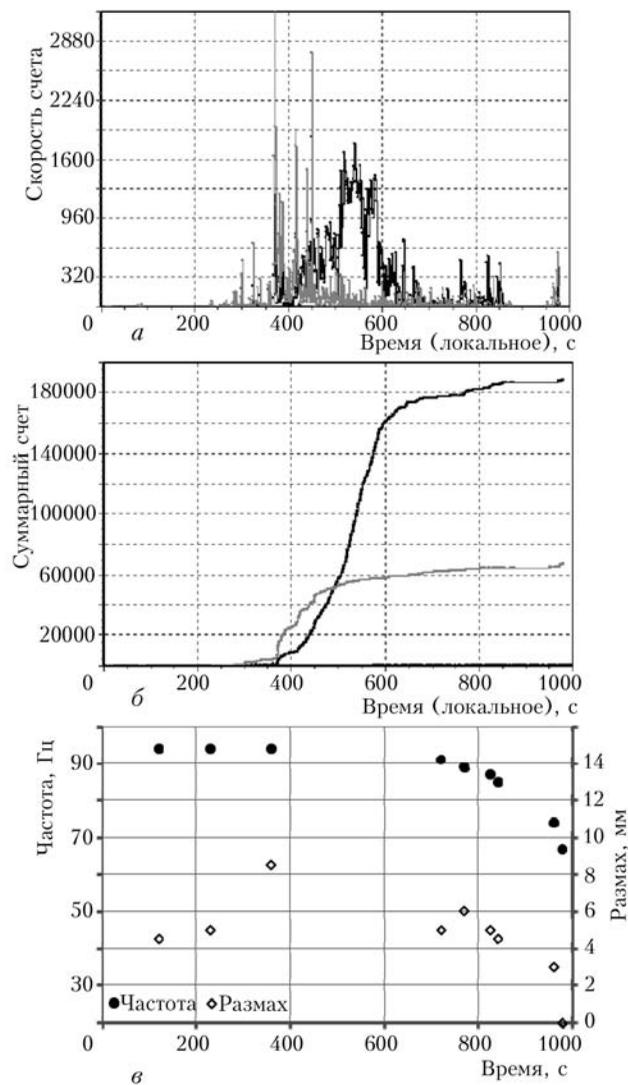


Рис. 4. Зависимости скорости счета сигналов АЭ (а), их суммарного счета (б) и режимов первой формы собственных колебаний образца из сплава Д16Т (в) от времени испытания

Из рис. 5 видно, что в образце из сплава Ст3 одиночные сигналы АЭ появились и в канале 1, и в канале 2 при установлении размаха колебаний 3,75 мм. При повышении размаха до 4,75 мм сначала наблюдался всплеск скорости счета в канале 2, который не сопровождался заметным увеличением количества сигналов АЭ, затем в канале 1 появилось небольшое количество сигналов. После снятия нагрузки и повторного установления размаха 4,75 мм сначала наблюдался всплеск скорости счета и суммарного счета в канале 1, затем в канале 2 появились сигналы АЭ. При повышении размаха до 5 мм в обоих каналах картина повторилась, но для больших значений параметров АЭ. Затем в установившемся разрушающем режиме колебаний (5 мм) в обоих каналах регистрировали сигналы АЭ, однако, в канале 1 на фоне постоянного уровня скорости счета наблюдались отдельные всплески с соответствующими скачками суммарного счета, а в канале 2 процесс был более равномерным, а самый большой всплеск параметров наблюдался незадолго до появления макротрещины. Отметим, что повышение быст-

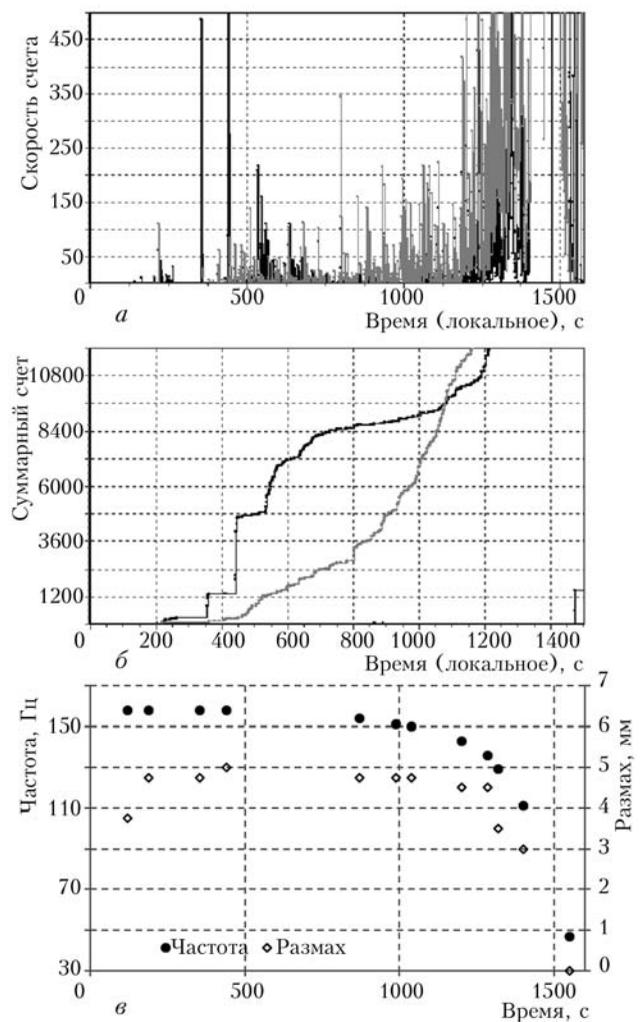


Рис. 5. Зависимости скорости счета сигналов АЭ (а), их суммарного счета (б) и режимов первой формы собственных колебаний образца из стали Ст3 (в) от времени испытания



роты изменения во времени скорости счета и, соответственно, суммарного счета в одном канале соответствовала уменьшению в другом. При этом в канале 1 суммарный счет все время был в несколько раз больше, чем в канале 2. К 870 с появилась макротрещина и нарушился установившийся режим колебаний. Начиная с 990 с образец довели до полного разрушения путем многократного подстраивания режима нагружения. Введение образца в резонанс сопровождалось развитием макротрещины и значительным увеличением скорости счета и быстроты изменения суммарного счета, уровень которых соизмерим до 1200 с с полученным на стадии накопления микротрещин. Начиная с 1200 с после введения образца в очередной резонанс, скорость счета резко возросла и продолжала при последующем долоте возрастать вплоть до изменения на порядок. Это возрастание, очевидно, обусловлено трением берегов макротрещины. Зависимость суммарного счета от времени нагружения соответствует зависимости скорости счета.

Видно, что в образце из стеклотекстолита при малых уровнях нагрузки наблюдалось небольшое число сигналов АЭ в канале 1 (рис. 6). При установлении размаха колебаний 8,5 мм в канале 1 появилось значительное число сигналов АЭ. При этом сначала наблюдался всплеск скорости счета, затем скорость счета АЭ возросла до максимума и уменьшилась. Такое возрастание и убывание, но при более низких значениях скорости счета, наблюдалось еще раз. При повышении размаха до 11,5 мм в канале 1 наблюдалась та же картина, но при больших значениях скорости счета. В канале 2 сразу после установления этой амплитуды появилось небольшое количество сигналов АЭ. При повышении размаха до 14 мм в канале 1 наблюдалась та же картина, но без переходного всплеска и при еще больших значениях скорости счета. Повышение размаха до 15 мм привело к резкому увеличению числа сигналов АЭ: в канале 1 наблюдалась та же картина, что и на предыдущем уровне, но при больших примерно в два раза значениях скорости счета. В канале 2 изменения скорости счета во времени повторили изменения в канале 1, но на уровне примерно в два раза меньшем. При увеличении размаха до 16 мм в обоих каналах повторилась та же картина, что и на предыдущем уровне, но на меньших примерно в два раза значениях скорости счета. При увеличении размаха до 18,5 мм снова повторялась в обоих каналах та же картина, что и на предыдущем уровне, но на больших значениях скорости счета. Каждый раз скорость счета после увеличения падала практически до 0. Зависимость суммарного счета от времени нагружения соответствует зависимости скорости счета.

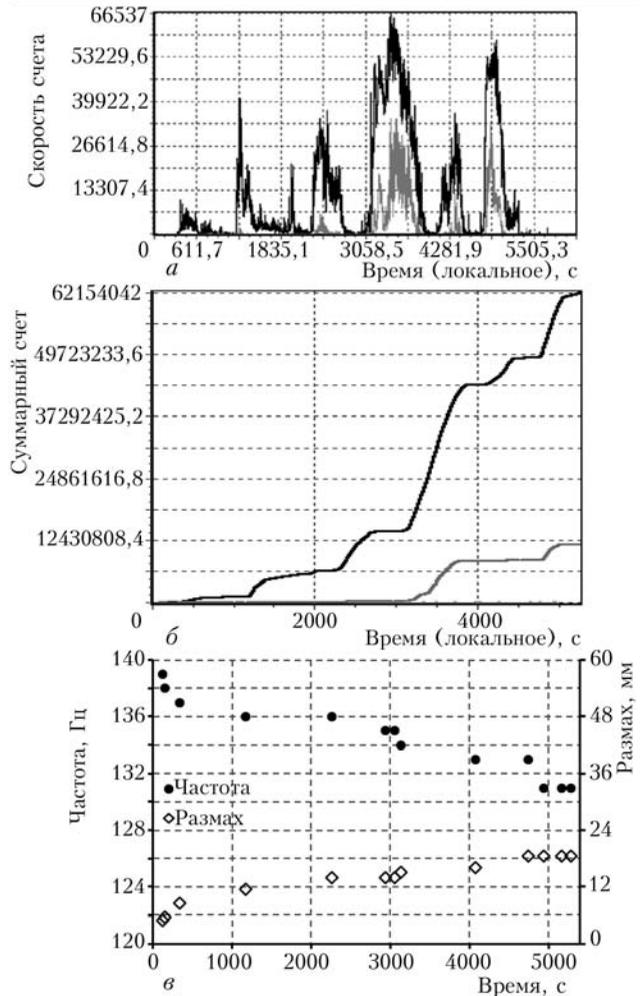


Рис. 6. Зависимости скорости счета сигналов АЭ (а), их суммарного счета (б) и режимов первой формы собственных колебаний образца из стеклотекстолита (в) от времени испытания

Из рис. 7 видно, что в образце из сплава Д16Т при нагружении на второй форме собственных колебаний одиночные сигналы АЭ появились и в канале 1, и в канале 2 при установлении размаха колебаний 0,5 мм. Количество этих сигналов нарастало примерно с одинаковой скоростью и постепенным увеличением размаха до 2,15 мм на 940 с. Затем в установившемся разрушающем режиме колебаний (2,15 мм), когда частота оставалась постоянной, а амплитуда падала (что свидетельствовало о развитии поврежденности материала) в обоих каналах количество сигналов АЭ возрастало, причем в канале 2 намного быстрее. В районе 1400 с скорость счета в канале 2 стала резко возрастать вплоть до нескольких порядков при наличии отдельных мощных выбросов, затем немного уменьшилась и стала примерно постоянной вплоть до подстройки резонансной частоты на 2340 с. Соответствующим образом в канале 2 возрастал суммарный счет. В канале 1 при этом продолжало постепенно возрастать количество сигналов АЭ. В момент 2340 с образец снова был введен в резонанс, но уже на более

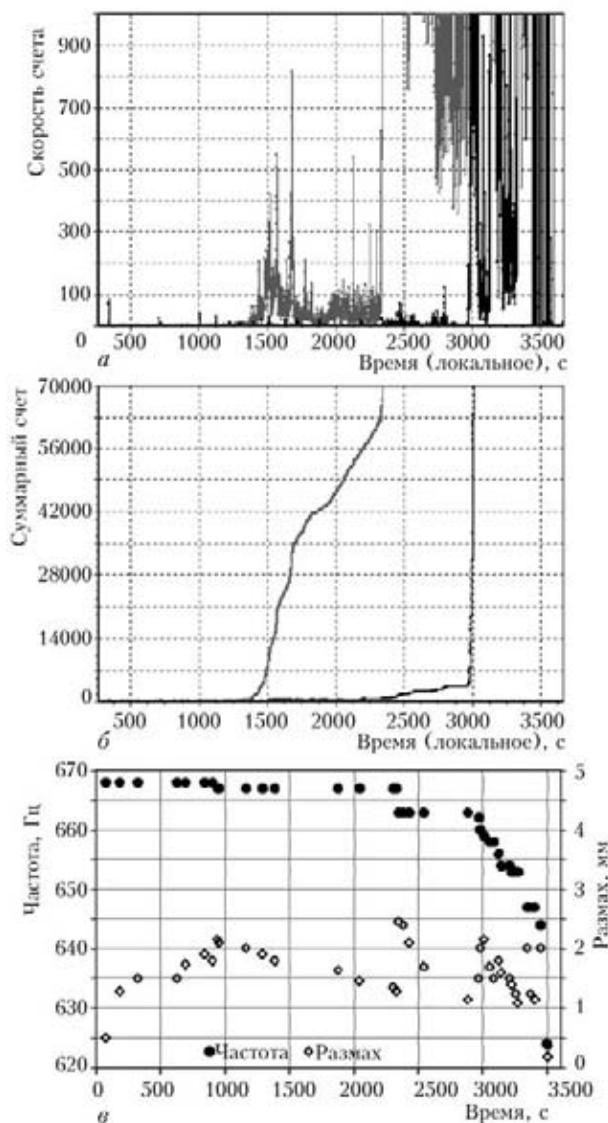


Рис. 7. Зависимости скорости счета сигналов АЭ (а) (един/с), их суммарного счета (б) (един) и режимов второй формы собственных колебаний образца из сплава Д16Т (в) от времени испытания (с)

низкой частоте колебаний, и установлен разрушающий размах колебаний 2,45 мм. При этом скорость счета во втором канале катастрофически возросла и достигла примерно 15000 один/с, а суммарный счет также стал быстро нарастать и вскоре превысил 10^6 один/с. В канале 1 скорость счета заметно увеличилась, два раза постепенно возросла до 100 один/с с последующим убыванием. Начиная с 2970 с образец доводили до полного разрушения путем многократного подстраивания режима нагружения. Введение образца в резонанс сопровождалось развитием макротрещины, что подтверждает падение частоты резонанса, а так же значительным увеличением скорости счета и быстроты изменения суммарного счета в обоих каналах, уровни которых на несколько порядков превышали предыдущие значения. Как и для других металлических образцов, это возрастание, очевидно,

обусловлено трением берегов макротрещины, что подтверждается анализом фрактограммы излома образца.

Анализ разницы времен прихода поступивших сигналов АЭ показал, что для всех испытанных образцов они появляются с частотой нагрузки образца.

Фотографии участков образцов в зоне концентраторов напряжений после испытаний показаны на рис. 8. Виден характер разрушения каждого материала после испытаний. Для Ст3 результирующая макротрещина аналогична показанной на рис. 8, а. Трещина на рис. 8, б имеет классический [3] для высокоскоростного многоциклового усталостного разрушения вид. Для стеклотекстолита (рис. 8, в) характерна ячеистая структура и наличие каркасных волокон, часть из которых не разрушилась в результате испытаний.

Анализ рис. 4–8 позволяет выделить закономерности появления сигналов АЭ и изменения их спектрального состава, обусловленные режимом нагружения и стадией разрушения образца, а также выявить особенности этих закономерностей для материалов Д16Т, Ст3, стеклотекстолита, отражающие неодинаковость процесса усталостной поврежденности и сопоставить эти закономерности с традиционными представлениями о процессе многоциклового усталостного разрушения материала.

1. Для стальных материалов независимо от формы колебания образца процесс появления сигналов АЭ можно разбить на три характерные стадии. Первая стадия (накопление микрповреждений) связана с появлением одиночных сигналов при неразрушающих на макроуровне нагрузках или сразу после установления разрушающей нагрузки (сигналы обусловлены микроразрушениями материала). Вторая стадия (развитие макроповреждения) связана с резким увеличением скорости появления и количества сигналов АЭ при постоянном режиме наружения, что обусловлено зарождением и развитием макротрещины в материале. Третья стадия (долом), как правило, характеризуется лавинообразным увеличением скорости появления и количества сигналов АЭ, сопровождающимся постоянными срывами резонансных колебаний образца. Эта стадия обусловлена трением берегов развитой макротрещины, а в отсутствие трения уровень сигналов может быть значительно ниже, чем на предыдущей стадии. В процессе разрушения материала при постоянном разрушающем режиме часто наблюдалось циклическое изменения, скорости счета (неоднократное увеличение с последующим спадом). Уровень сигналов АЭ на разных стадиях отличается, как правило, на порядки.

2. Для стеклотекстолита сигналы АЭ фиксировали с самого начала нагружения (постоянное накопление разрушения, начиная с малых уровней

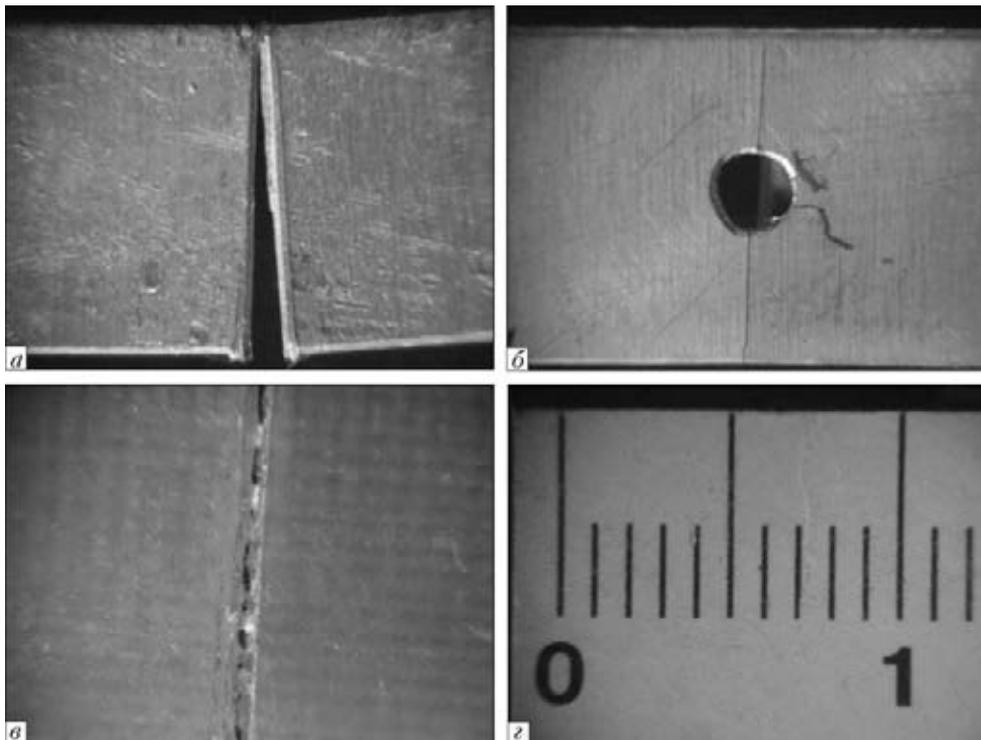


Рис. 8. Образцы после испытаний: а — Д16Т (применена первая собственная форма изгибных колебаний); б — Д16Т (вторая форма); в — стеклотекстолит (первая форма); г — масштабная линейка

нагрузки, характерно для композиционных материалов), а их уровень изменялся циклически (для параметров АЭ, отображающих скорость развития) или ступенчато (для параметров АЭ, отображающих накопление повреждений) в соответствие времени разрушения каждой ячейки материала. Таким образом, стадии появления сигналов АЭ здесь связаны с разрушением отдельных ячеек материала, а уровни нагрузки являются вторичными факторами, влияющими на степень разрушения, но не закономерности разрушения материала.

3. Принципиальных отличий в закономерностях появления сигналов АЭ при нагружении на первой и второй формах колебаний образцов из Д16Т не обнаружено, однако уменьшение объема локализации высоких напряжений при второй форме нагружения образцов приводит к соответствующему уменьшению области накопления усталостных повреждений. В результате значительно уменьшается количество сигналов, поступающих на каналы 1 и 2 на стадии накопления микроповреждений. Стадии, связанные с зарождением и развитием макротрещины, для обоих этих видов нагружения аналогичны.

4. В процессе испытаний наблюдалась неоднократная смена чувствительности каналов 1 и 2 к процессу накопления повреждений в материале, что свидетельствует об изменении спектра частот в процессе разрушения материала. В отдельные моменты чувствительность одного из каналов падала до 0, тогда как на втором активно появлялись сигналы АЭ. Обнаруженный эффект требует даль-

нейших исследований. Возможно, он связан с особенностями колебаний источника АЭ, исследованных нами в работе [13].

5. Сигналы АЭ для всех исследованных материалов появлялись синхронно с частотой возбуждения образца, что подтверждает их природу, обусловленную режимом нагружения.

Выводы

Учет особенностей, в первую очередь для акустического тракта, эксплуатации системы регистрации сигналов АЭ в процессе высокоскоростного циклического консольного изгиба образцов позволяет эффективно ее использовать для выявления сигналов АЭ, сопутствующих разрушению материала при многоциклового усталости.

Параметры АЭ хорошо отражают известные особенности разрушения металлических и композиционных материалов на всех стадиях усталости начиная с микропластического деформирования и заканчивая доломом образца.

Установлено, что для всех исследованных материалов появление сигналов АЭ при высокоскоростном циклическом консольном изгибе образцов независимо от формы колебаний носит периодический характер с периодом, соответствующим частоте нагружения образца.

Выявлено, что спектр сигналов АЭ изменяется в зависимости от стадии разрушения, что необходимо учитывать при обработке принимаемого сигнала для повышения эффективности контроля.

Показано, что уровень сигналов АЭ существенно зависит от стадии разрушения, а также час-



тотного диапазона и может изменяться на шесть и более порядков. При этом наименьший уровень сигналов характерен для стадий накопления повреждений до зарождения макротрещины, на стадии стационарного развития макротрещины уровень сигналов имеет среднюю величину и достигает максимальных значений на стадии долома образца. Это требует обеспечения соответствующего динамического диапазона аппаратуры регистрации и отображения информации.

При установленном режиме нагружения практически во всех испытаниях наблюдалась некоторая цикличность появления сигналов АЭ, заключающаяся в их неоднократном нарастании и спаде при наличии отдельных всплесков активности.

Развитие работ в этом направлении может быть связано с накоплением экспериментальных данных для построения статистически обоснованных корреляционных зависимостей между поврежденностью материала и параметрами АЭ с последующей разработкой на их основе методов оценки состояния материала по результатам измерения параметров АЭ, а также с изучением природы изменения спектра и проявления цикличности при появлении сигналов АЭ.

1. *Неразрушающий контроль*: Справ.: В 7 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. — Т. 7: В 2 кн. Кн. 1: В. И. Иванов, И. Э. Власов. Метод акустической эмиссии. Кн. 2: Ф. Я. Балицкий, А. В. Барков, Н. А. Баркова и др. Вибродиагностика. — М.: Машиностроение, 2005. — 829 с.
2. *Безьямный Ю. Г.* Ультразвуковые технологии в материаловедении // Неорганическое материаловедение: Энциклопед. изд.: В 2 т. / Под ред. Г. Г. Гнесина, В. В. Скорохода. — Т. 2. Кн. 2. Материалы и технологии. — Киев: Наук. думка, 2008. — С. 574–584.
3. *Усталостные* испытания на высоких частотах нагружения / Под ред. В. А. Кузьменко // В. А. Кузьменко, Л. Е. Матошно, Г. Г. Писаренко и др. — Киев: Наук. думка, 1979. — 336 с.
4. *Иванова В. С., Терентьев В. Ф.* Природа усталости металлов. — М.: Металлургия, 1975. — 456 с.
5. *Афанасьев Н. Н.* Статистическая теория усталостной прочности металлов. — Киев: Изд-во АН УССР, 1953. — 128 с.
6. *Акустическая эмиссия и ее применение в ядерной энергетике* / Под ред. К. Б. Вакара // В. И. Артюхов, К. Б. Вакар, В. И. Макаров и др. — М.: Атомиздат, 1980. — 216 с.

7. *Грешников В. А., Дробот Ю. Б.* Акустическая эмиссия. Применение для испытаний материалов и изделий. — М.: Изд-во стандартов, 1976. — 272 с.
8. *Гришаков С. В., Кузьменко В. А., Писаренко Г. Г.* Использование акустической эмиссии для исследования усталости пьезоэлектрической керамики // Докл. II Всесоюз. семинара «Прочность материалов и элементов конструкций при звуковых и ультразвуковых частотах нагружения». — Киев: Наук. думка, 1980. — С. 458–460.
9. *Долбин Н. А., Довгялло И. Г., Борд В. И.* Влияние внутреннего давления на долговечность и акустическую эмиссию трубок при высокочастотном нагружении // Докл. III Всесоюз. семинара «Прочность материалов и элементов конструкций при звуковых и ультразвуковых частотах нагружения». — Киев: Наук. думка, 1983. — С. 71–76.
10. *Исследование* процесса высокочастотной усталости конструкционной керамики методом акустической эмиссии / Ю. Г. Безьямный, С. В. Гришаков, В. С. Дробинский, А. Д. Шевчук // Там же. — С. 76–79.
11. *Вакар К. Б.* Приборы и информационные системы регистрации и обработки сигналов акустической эмиссии // Акустическая эмиссия материалов и конструкций (1-я Всесоюз. конф.). Ч. 1 — Ростов-на-Дону: Изд-во Ростов. ун-та, 1989. — С. 106–114.
12. *Буйло С. И.* О связи параметров акустической эмиссии с особенностями кинетики деформации и микроразрушения твердых тел // Там же. — С. 125–132.
13. *Галаненко В. Б., Галаненко Д. В.* К расчету поля локального источника в упругом изотропном слое // Акустический симпозиум «Консонанс-2003» / Зб. праць. — Київ, 2007. — С. 43–48.
14. *Безьямный Ю. Г., Галаненко Д. В.* Развитие акустико-эмиссионного метода для исследования процесса многоциклового усталости материалов // Фізичні методи та засоби контролю середовищ матеріалів та виробів. Вип. 13: Теорія і практика неруйнівного контролю матеріалів і конструкцій. — Зб. наук. праць, 2008. — С. 100–106.
15. *Безьямный Ю. Г., Галаненко Д. В.* Адаптация метода акустической эмиссии к усталостным испытаниям материалов на высоких частотах нагружения // Фізичні методи та засоби контролю середовищ матеріалів та виробів. Вип. 14: Неруйнівний контроль матеріалів і конструкцій, 2009. — С. 29–35.
16. *Безьямный Ю. Г., Галаненко Д. В., Колесников А. Н.* Система для выявления сигналов акустической эмиссии в процессе резонансного нагружения образца // Вісн. Нац. техн. ун-ту «ХПН» / Зб. наук. праць «Електроенергетика та перетворювальна техніка». — 2012. — № 40. — С. 87–96.
17. *Использование* метода акустической эмиссии для исследования усталости материалов в процессе высокоскоростного циклического деформирования / Ю. Г. Безьямный, Д. В. Галаненко, К. А. Комаров, О. В. Талько // Вісн. укр. матеріалознав. тов-ва. — 2012. — Вип. 5. — С. 63–71.
18. *Комплекс* дефектоскопический акустико-эмиссионный «ГАЛС-1». Руководство по эксплуатации «ГАЛС-1». 32828482.001.07РЭ. ЗАО «УкрНИИ НК». Киев, 2007.

Поступила в редакцию
29.10.2012



ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ОБЪЕКТОВ НА ФОНЕ ПОМЕХ

Е. В. ШАПОВАЛОВ, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрен общий подход к задаче разработки алгоритмического обеспечения систем технического зрения, которые могут использоваться для принятия решений о состоянии исследуемого объекта. Предложены высокопроизводительные алгоритмы обработки цифровых изображений в лазернотелевизионных сенсорных системах, предназначенных для бесконтактного сбора диагностических данных о геометрических параметрах железнодорожного пути.

A general approach to the problem of development of algorithmic support of machine vision systems is considered, which can be used to take decisions on the examined object condition. High-efficient algorithms are proposed for digital image processing in laser TV sensor systems designed for contactless acquisition of diagnostic data on geometrical parameters of the railway tracks.

Техническое зрение давно привлекает внимание специалистов, занимающихся исследованиями и разработками в области искусственного интеллекта. Для реализации механизмов принятия решений необходимы входные данные, которые могут предоставляться с помощью систем технического зрения (СТЗ), действующих в качестве регистраторов информации о текущем состоянии исследуемого объекта.

Последовательность обработки видеосигналов в СТЗ состоит из этапов формирования, сегментации, описания и анализа изображений. Изображения рассматриваются как двумерные цифровые сигналы. На этапе формирования изображения осуществляется взаимодействие с аппаратными средствами, предназначенными для регистрации входного видеосигнала. При этом выполняется линейное и нелинейное усиление сигнала, смещение нулевого уровня и другие преобразования, обеспечивающие требуемые амплитудно-частотные характеристики и отношение сигнал-шум. После регистрации выполняется предварительная обработка изображения, которая может включать следующие операции: снижение уровня шумов с помощью цифровой фильтрации и сглаживания; улучшение визуального качества изображений путем преобразования шкалы интенсивности, обострения перепадов и подчеркивания границ; бинаризация и другие вспомогательные математические операции над изображением (дифференцирование, логическое сравнение и т. п.). На этапе сегментации изображений выполняется декомпозиция рабочей области на отдельные фрагменты, выделение контуров, нахождение однородных областей и выделение типичных особенностей изображений. Этап описания изображений связан с решением задач расчета количественных характе-

ристик (признаков) объектов, определения качественных признаков для классификации объектов, оценки местоположения и ориентации объектов на изображении. На последнем этапе обработки изображения выполняется распознавание образов или классификация объектов с последующим анализом полученных результатов. В случаях, когда осуществляется контроль геометрических параметров или взаимного положения объектов, необходимо выполнять преобразование экранных координат найденных точек объекта в некоторую глобальную метрическую систему координат.

На сегодня создан достаточно мощный математический аппарат обработки изображений. Разработано множество методов и алгоритмов, связанных с применением цифровой обработки сигналов для улучшения визуального качества изображений [1]. Предлагается значительное количество методов анализа и проектирования цифровых фильтров, применяемых для снижения уровня шумов на изображениях [2]. Существует множество подходов к решению задач, связанных с дискретизацией, фильтрацией, сегментацией изображений и выделением контуров объектов [3]. Разработаны эффективные в вычислительном отношении быстрые алгоритмы свертки и медианной фильтрации изображений [4]. Существуют установившиеся методы и алгоритмы, связанные с классификацией объектов и распознаванием образов [5]. Вместе с тем не существует некоторого стандартного набора методов и алгоритмов, который бы позволил построить универсальную СТЗ. Алгоритмы обработки видеосигналов зависят от типа используемого оптического датчика и особенностей конкретной задачи, возложенной на систему. Также на алгоритмы обработки изображений накладывается еще одно существенное ограничение, связанное с их быстродействием



при программной реализации. Время обработки изображения не должно превышать период обновления кадров в оптической системе. При этом необходимо учитывать, что вычислительный блок СТЗ должен не только обрабатывать видеосигнал, но и взаимодействовать с внешними устройствами путем приема-передачи управляющих и информационных сигналов, что также требует определенных вычислительных затрат. Таким образом, при разработке математического обеспечения СТЗ необходимо решать задачу формирования набора методов и алгоритмов, позволяющего наиболее эффективно решать поставленную задачу с обеспечением необходимого быстродействия при программной реализации.

В настоящее время широкое распространение получили триангуляционные СТЗ, основанные на линейном структурированном подсвете поверхности объекта. Излучение точечного источника, чаще всего лазерного, разворачивается в плоскость с помощью цилиндрической оптики или колеблющегося зеркала. При пересечении световой плоскости с поверхностью объекта формируется световой след, повторяющий рельеф поверхности. Видеокамера, расположенная под некоторым триангуляционным углом к световой плоскости, регистрирует изображения светового следа, в результате обработки которых могут определяться необходимые геометрические параметры и относительное смещение объекта. В дополнение к бесконтактности и безынерционности к преимуществам таких СТЗ также относится высокое отношение сигнал-шум в исходном сигнале.

Несмотря на все преимущества СТЗ, основанных на лазерной триангуляции, их надежность в основном определяется применяемыми алгоритмами обработки изображений, т. е. элементами внедренного искусственного интеллекта. Алгоритмическое обеспечение СТЗ должно решать следующие основные задачи:

- обнаружение контура светового следа на изображении;
- выделение полезного сигнала на фоне возможных помех;
- определение характерных точек объекта.

Обнаружение контура светового следа является одной из самых ресурсоемких операций, поскольку требует обработки двумерного массива точек изображения. Следовательно, при разработке соответствующего алгоритма необходимо стремиться максимально возможно повысить его быстродействие. Обнаруженный контур светового следа представляет собой массив точек, который может содержать как полезный сигнал, так и помехи. Под выделением полезного сигнала понимается выбор из массива только тех точек, которые соответствуют поверхности исследуемого объекта. В качестве характерных выступают точ-

ки, относительно которых необходимо определять размеры или смещение объекта.

В качестве примера рассмотрим построение алгоритмического обеспечения лазерно-триангуляционной СТЗ, предназначенной для измерения относительного смещения железнодорожного рельса. Несколько таких СТЗ, установленных на раме путеизмерительного вагона, могут обеспечить бесконтактное измерение трех из четырех основных параметров рельсового пути, а именно ширину колеи и стрелы изгиба рельсов в горизонтальной и вертикальной плоскостях [6]. Их преимущества перед контактными датчиками, которые в основном используются на путеизмерительных вагонах, очевидны. Это и отсутствие износа контактирующих деталей, и безынерционность, и более высокая точность измерения. Вместе с тем рельсовая колея характеризуется наличием значительного количества механических помех, которые могут негативно влиять на работу СТЗ. В рабочую зону устройств регистрации оптического излучения кроме рельсов могут попадать элементы рельсовых креплений, переездов, стрелочных переводов, снег, растительность или другие посторонние предметы. В основном именно эти обстоятельства и препятствуют широкому распространению СТЗ на путеизмерительной технике. Также присутствуют экономические причины, связанные с высокой стоимостью СТЗ, которая определяется требуемой вычислительной мощностью устройств обработки изображений. Снизив требования к мощности вычислительных устройств, можно добиться существенного снижения стоимости СТЗ.

Световой след на цифровых изображениях представлен в виде пикселей с более высокой яркостью (интенсивностью) по сравнению с окружающим фоном (рис. 1, а). В общем случае фоновый шум является нестационарным с априорно неизвестным законом распределения вероятностей. Таким образом, для обнаружения контура светового следа на цифровых изображениях целесообразно использовать согласованно избирательный фильтр (СИФ) с последующим анализом максимальных откликов фильтра [7]. Основное отличие СИФ от оптимальных (согласованных) фильтров заключается в том, что для синтеза его структуры нет необходимости в априорной информации о конкретных изображениях окружающего объекта фона. Задача обнаружения нитевидных объектов, к которым относится световой след, в основном решается с помощью одномерных СИФ. Использование одномерных СИФ позволяет существенно повысить быстродействие алгоритмов обработки изображений по сравнению с двумерной фильтрацией. Выходным сигналом одномерного СИФ является результат дискретной свертки значений яркости пикселей, соответствующих столбцу



(строке) исходного изображения, с импульсной функцией:

$$y(i) = \sum_{n=-b/2}^{b/2} x(i+n)h(n),$$

где y — результат свертки; x — яркость пикселя исходного изображения; b — база фильтра; i — номер строки изображения; h — импульсная характеристика СИФ.

Расчет импульсной характеристики СИФ выполняется в соответствии со следующей формулой:

$$h(n) = 2s(t-1-n) - s(t-2-n) - s(t-n),$$

где t — количество значащих элементов импульсной функции СИФ; s — идеализированный импульс яркости в виде нормированной функции, описывающей распределение яркости пикселей вдоль столбцов изображения в области светового следа; n — номер элемента идеализированного импульса яркости s .

Анализ тестовых изображений светового следа показал, что идеализированный импульс яркости s в достаточной мере соответствует равнобедренной трапеции. Полученная формула СИФ фильтра без учета нормирующего коэффициента имеет следующий вид:

$$y(i) = -x(i-l_2/2) + x(i-l_1/2) + x(i+l_1/2) - x(i+l_2/2),$$

где l_1, l_2 — длины верхней и нижней основ трапеции, описывающей идеализированный импульс яркости s .

Таким образом, синтезированный СИФ имеет достаточно высокую вычислительную эффективность. Для вычисления отклика фильтра достаточно выполнить всего лишь три простые арифметические операции.

Для принятия решения о принадлежности точки (i_{max}, j) , соответствующей максимальному отклику фильтра y_{max} в j -м столбце, используется пороговое сравнение:

$$(i_{max}, j) \in c, y_{max} > \bar{y} + k_e \sigma_y,$$

где \bar{y}, σ_y — оценки математического ожидания (среднее значение) и дисперсии (среднеквадрати-

ческое отклонение) откликов СИФ; c — массив точек контура; k_e — экспериментальный коэффициент.

Значения \bar{y}, σ_y , найденные при обработке предыдущего кадра, используются при анализе результатов фильтрации текущего изображения, что позволяет алгоритму обнаружения контура светового следа подстраиваться под изменения внешней освещенности объекта (рельса). Результат обнаружения контура светового следа представляет собой массив дискретных точек (рис. 1, б).

Полезным сигналом в обнаруженном контуре светового следа является сегмент, соответствующий головке рельса, все остальные сегменты представляют собой помехи. Кроме того, из-за износа боковая грань головки рельса может иметь произвольную форму. Следовательно, единственным участком контура, который имеет относительно стабильную форму и может быть распознан, является часть кривой, соответствующая верхней грани головки рельса.

Верхняя грань головки рельса чаще всего имеет небольшую кривизну, но в общем случае может рассматриваться как прямая. Наиболее распространенный метод распознавания прямых линий на цифровых изображениях базируется на преобразовании Хафа, согласно которому каждую точку на изображении можно представить в виде семейства прямых:

$$F(\rho, \varphi, x, y) = x \cos \varphi + y \cos \varphi - \rho,$$

где $\rho_{min} \leq \rho \leq \rho_{max}, \varphi_{min} \leq \varphi \leq \varphi_{max}$ — параметры прямых в полярных координатах.

Распознавание прямых линий на бинарных изображениях выполняется следующим образом. Значения ρ и φ изменяются от ρ_{min} до ρ_{max} с шагом $\Delta\rho$ и от φ_{min} до φ_{max} с шагом $\Delta\varphi$ соответственно. При этом формируется матрица $G(\rho, \varphi)$, элементы которой содержат количество найденных точек, удовлетворяющих неравенству:

$$|x \cos \varphi + y \cos \varphi - \rho| \leq \rho_n,$$

где ρ_n — заданное пороговое значение.

Значения ρ и φ , которые соответствуют элементу матрицы G с максимальным значением,

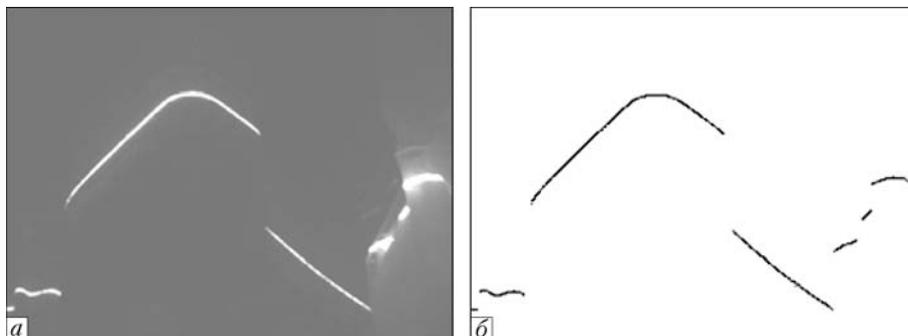


Рис. 1. Исходное изображение светового следа на поверхности рельса (а) и результат обнаружения контура светового следа (б)



принимаются в качестве результатов распознавания прямой линии. Несмотря на простоту метода Хафа его практическая реализация связана с рядом трудностей. Во-первых, перебор по двум параметрам ρ и φ представляет собой достаточно ресурсоемкий процесс. Во-вторых, необходим значительный объем памяти для хранения элементов матрицы G . Для повышения производительности процедуры распознавания и экономии памяти предложено оптимизировать метод Хафа следующим образом. Для каждого значения $\varphi \in [\varphi_{\min}; \varphi_{\max}]$ с шагом $\Delta\varphi$ выполняется поворот всех точек массива c вокруг центра изображения. Координаты точек после каждого поворота записываются в массив c' . Далее определяется номер столбца изображения j' , в котором находится максимальное количество точек m массива c' . При этом формируется массив g , каждый элемент которого содержит три значения φ' , j' и m . После перебора всех значений угла поворота в массиве g осуществляется поиск максимального значения m_{\max} и на основании соответствующих значений φ' , j' восстанавливается уравнение прямой в виде $i = kj + b$, которое принимается в качестве результата распознавания (рис. 2, а). Для компенсации шума в кривой контура значения m в массиве g предварительно сглаживаются путем усреднения k соседних значений. Данный алгоритм полностью сохраняет функциональность метода Хафа, но при этом отличается более высокой производительностью и существенной экономией памяти. Перебор только по одному параметру позволяет повысить производительность более чем на порядок. В качестве точек, соответствующих верхней грани головки рельса, принимаются точки, расстояние от которых до найденной прямой не превышает заданную базу усреднения k . Диапазон возможного изменения углов наклона про-

филя рельса на изображении заранее известен. Параметр m_{\max} может служить в качестве индикатора наличия полезного сигнала на изображении. Если значение m_{\max} меньше некоторого порогового значения, то обработка текущего изображения прекращается и формируется сообщение об ошибке.

Для поиска остальных точек, которые соответствуют боковой грани головки рельса, достаточно использовать то обстоятельство, что номинальные размеры головки рельса определенного типа являются константами, а размеры головки изношенного рельса могут изменяться только в сторону уменьшения. Для оценки размеров объекта по его изображению необходимо выполнять преобразование от экранных координат (i, j) к метрическим координатам реального пространства в световой плоскости (y, z) . Для реализации данного преобразования можно использовать математическую модель, описывающую связь между видеокамерой, лазером и пространством объектов [8]. Параметры модели определяются в процессе калибровки сенсорного блока. После преобразования координат на основании номинальных размеров головки рельса несложно определить область, в которой могут находиться точки, соответствующие боковой грани головки рельса (рис. 2, б). Точки, находящиеся в заданной области, добавляются к массиву, содержащему найденный профиль верхней грани головки рельса.

После обнаружения профиля головки рельса необходимо определить координаты характерных точек, относительно которых определяются размеры или смещение объекта. В соответствии с нормативными требованиями вертикальное смещение рельса определяется относительно центра верхней грани головки рельса, а горизонтальное (поперечное) смещение — относительно точки на боковой грани головки рельса, находящейся на 13 мм ниже верха его головки. Таким образом, первая харак-

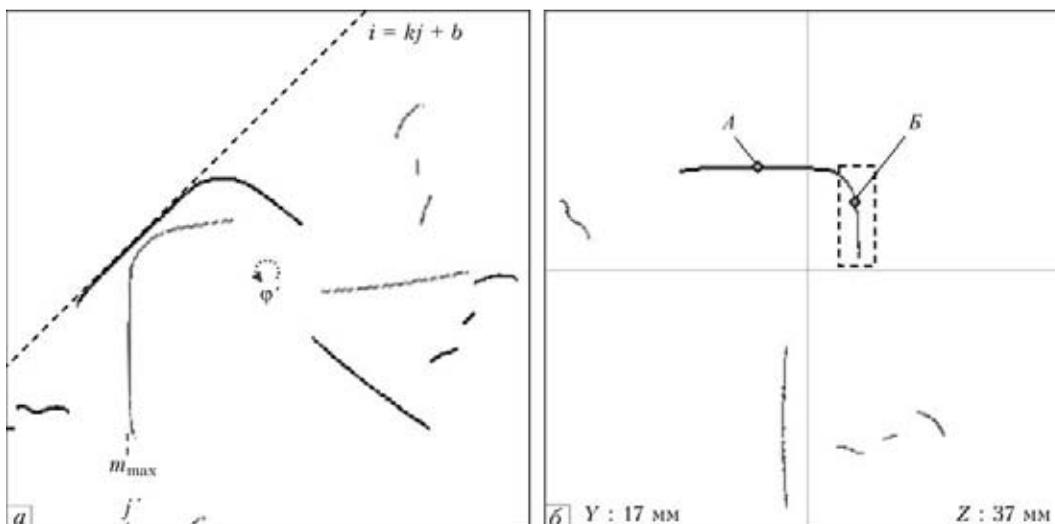


Рис. 2. Поиск профиля головки железнодорожного рельса: а — обнаружение верхней грани головки; б — обнаружение боковой грани головки и характерных точек



терная точка вычисляется как горизонтальная координата центра масс для массива точек, соответствующих верхней грани головки рельса, вторая — как точка пересечения кривой, соответствующей боковой грани головки рельса, с прямой линией, опущенной на 13 мм относительно первой характерной точки (точки *A* и *B* на рис. 2, б). Перед вычислением координат точки *B* профиль боковой грани головки рельса представляется в виде интерполяционного полинома.

Выводы

Разработанное алгоритмическое обеспечение позволило создать экспериментальную модель лазерно-триангуляционной СТЗ с рабочей частотой 100 Гц на базе недорогого микропроцессора с незначительной на сегодня тактовой частотой в 500 МГц. В ходе экспериментов установлено, что СТЗ способна эффективно функционировать в условиях механических помех, характерных для отечественного железнодорожного пути. Относительные потери данных не превышают 0,5 %. Предложенная методика разработки алгоритмического обеспечения может быть использована при создании ряда высокопроизводительных ла-

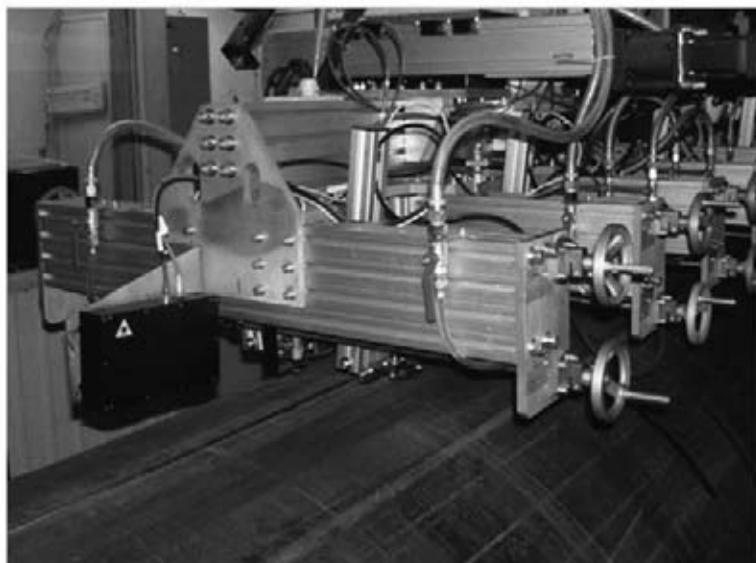
зерно-триангуляционных СТЗ, предназначенных для обнаружения объектов с линейными элементами на фоне помех.

1. Прэтт У. Цифровая обработка изображений: Пер. с англ. // Под ред. Д. С. Лебедева. — М.: Мир, 1982. — Кн. 2. — 480 с.
2. Голд Б., Рэйдер Ч. Цифровая обработка сигналов: Пер. с англ. // Под ред. А. М. Трахтмана. — М.: Сов. радио, 1973. — 363 с.
3. Павлидис Т. Алгоритмы машинной графики и обработки изображений / Пер. с англ. — М.: Радио и связь, 1986. — 400 с.
4. Блейхут Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов / Пер. с англ. И. И. Грушко. — М.: Мир, 1989. — 448 с.
5. Форсайт Д. А., Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход // Пер. с англ. А. В. Назаренко, И. Ю. Дорошенко. — М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. — 928 с.
6. Железнодорожный путь: Учеб. для студ. вузов железнодорожного транспорта / Т. Г. Яковлева, Н. И. Карпущенко, С. И. Клинов и др. // Под ред. Т. Г. Яковлевой. — М.: Транспорт, 1999. — 405 с.
7. Введение в контурный анализ; приложения к обработке изображений и сигналов / Я. А. Фурман, А. В. Кревецкий, А. К. Передреев и др. // Под ред. Я. А. Фурмана. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. — 592 с.
8. Киселевский Ф. Н., Коляда В. А. Калибровка триангуляционных оптических сенсоров // Автомат. сварка. — 2005. — № 5. — С. 57–58.

Поступила в редакцию
26.06.2012

■ СИСТЕМА СЛЕЖЕНИЯ ЗА ШВОМ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ КОНТРОЛЕ СВАРНЫХ ТРУБ

Основная задача системы – автоматическая коррекция положения ультразвуковых датчиков относительно шва в процессе контроля. Точность слежения за швом составляет $\pm 0,5$ мм при скорости ультразвукового контроля до 30 м/мин. Система слежения используется в комплекте установки АУЗК НК-360 (НК-361) на предприятии ОАО «Выксунский металлургический завод» (Россия, 2005 г.).



РАЗРАБОТАНО В ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины



МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ЗАКУПОРКИ СКВОЗНЫХ ДЕФЕКТОВ ИЗДЕЛИЙ ПРИ КОНТАКТЕ С ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ РАСТВОРАМИ ПЕРЕД ИСПЫТАНИЯМИ НА ГЕРМЕТИЧНОСТЬ

В. Б. ВЫСКРЕБЦОВ, канд. техн. наук, **А. В. ШУЛЬЖЕНКО**, инж., **В. Н. ГРЕБЕННИКОВ**, канд. хим. наук, **П. А. МАНОРИК**, д-р хим. наук (Ин-т физической химии им. Л. В. Писаржевского, ГП «КОЛЮРАН»)

Показано, что при контакте сквозного дефекта изделия с технологическим раствором возможна закупорка канала дефекта выпавшим в осадок нелетучим компонентом раствора в виде «кристаллической пробки», препятствующей последующему выявлению дефекта средствами течеискания в процессе испытания изделия на герметичность. Предложена математическая модель распределения во времени концентрации нелетучего компонента по длине капиллярного канала дефекта после контакта полого изделия с таким раствором. Установлено, что до закупорки канала дефекта выпавшим в осадок нелетучим компонентом раствора в канале преобладает конвективный перенос этого компонента, а после закупорки канала перенос нелетучего компонента осуществляется только путем молекулярной диффузии вплоть до частичного или полного растворения «кристаллической пробки». Показано, что необходимым условием закупорки сквозного дефекта является повышение в устье канала дефекта концентрации нелетучего компонента технологического раствора до величины, существенно превышающей концентрацию насыщения этого компонента.

It is shown that at contact of a through-thickness defect of the item with process solution the defect channel closing by a precipitating non-volatile solution component in the form of a "crystalline plug" is possible, which prevents subsequent defect detection by leak detection means during item testing for tightness. A mathematical model of distribution in time of non-volatile component concentration along the length of capillary channel of the defect after hollow item contact with such a solution is proposed. It is established that before the defect channel closing by precipitating non-volatile component of the solution convective transfer of this component prevails in the channel, and after channel closing non-volatile component transfer takes place only through molecular diffusion right up to partial or complete dissolution of the "crystalline plug". It is shown that a mandatory condition of closing of a through-thickness defect is increase of process solution non-volatile component concentration in the defect channel mouth up to a value essentially increasing the saturation concentration of this component.

Испытания на прочность и следующие за ними испытания на герметичность — обязательные этапы технологии производства большинства крупногабаритных полых изделий, требования к надежности которых с учетом экстремальных условий эксплуатации особенно высоки [1].

Наиболее часто используемым методом прочностных испытаний таких изделий является пневматический, предусматривающий заполнение полости объекта сжатым воздухом. Однако в случае, когда величина «энергоемкости» изделия велика ($\geq 0,02 \text{ м}^3 \cdot \text{МПа}$), прибегают к более безопасным гидравлическим испытаниям на прочность. В качестве технологических жидкостей, которыми нагружают изделия в ходе таких испытаний, используют водные растворы различных ингибиторов коррозии конструкционных материалов, в частности, бихроматов, являющихся эффективными пассиваторами сталей, алюминия и сплавов на его основе [2].

Замечено [3], что по окончании гидроиспытаний, слива технологических растворов и сушки изделий некоторые сквозные дефекты оказываются закупоренными и не обнаруживаются сред-

ствами контроля герметичности на следующем этапе испытаний. Это обстоятельство негативно влияет на объективность оценки герметичного состояния изделий. Его следует также учитывать при разработке технологий совмещенных испытаний полых изделий на прочность и герметичность с использованием технологических растворов и химических средств локализации мест их утечек через сквозные дефекты.

Из изложенного следуют актуальность и важность изучения процессов, протекающих в сквозных дефектах с применением технологических растворов. Однако осуществление экспериментов с использованием реальных сквозных дефектов представляется крайне затруднительным. Поэтому в качестве моделей таких дефектов в опытах с растворами в настоящее время часто используют поровое пространство различных капиллярно-пористых материалов [4–8].

Анализ с позиций контроля герметичности некоторых общих закономерностей межфазного и диффузионного массообмена в поровом пространстве таких материалов показывает, что одной из наиболее вероятных причин закупорки сквозных



дефектов изделий, контактирующих со смачивающим технологическим раствором, является кристаллизация в каналах дефектов нелетучего компонента раствора [4, 5, 8]. Кристаллизации же предшествуют заполнение полостей дефектов раствором под действием капиллярных сил (капиллярная пропитка), быстрое испарение с поверхностей менисков летучей составляющей раствора и, как следствие, концентрирование в применисковых зонах нелетучего компонента раствора вплоть до наступления фазового перехода. Причем испарение при неизменном положении менисков (за счет подтягивания жидкости капиллярными силами) сопровождается диффузионным отводом нелетучего компонента вглубь дефектов.

Явления концентрирования и следующей за ним кристаллизации нелетучего компонента были экспериментально изучены на примере водных растворов бихромата калия в стеклянных капиллярах [4]. Причем в этих опытах модельный сквозной дефект сообщался с подпитывающим объемом, исходная концентрация бихромата калия в котором поддерживалась постоянной, что на практике имеет место при гидравлических испытаниях изделий на прочность.

Предложенные в работах [6, 7] одномерные математические модели, описывающие явления концентрирования нелетучего компонента раствора в поровом пространстве тел, основаны на решении уравнения молекулярной диффузии со слагаемым, учитывающим конвективный перенос нелетучего компонента:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + v \frac{\partial c}{\partial x}, \quad (1)$$

где c — текущая концентрация нелетучего компонента в растворе, заполняющем поровое пространство; t — время; D — коэффициент молекулярной диффузии нелетучего компонента в растворе; x — координата вдоль порового пространства; v — скорость движения раствора по поровому пространству к поверхности испарения.

В указанных работах получено точное решение этого уравнения при соответствующих краевых условиях. Кроме того, в работе [7] приведено также приближенное решение этого уравнения:

$$c(x, t) = c_0 + c_0 \left(1 + v \frac{t}{D} - v \frac{x}{D} \right) \exp(-v \frac{x}{D}), \quad (2)$$

где c_0 — начальная концентрация нелетучего компонента в растворе.

Отметим, что в практически значимом диапазоне параметров $v^2 \frac{t}{D} > 3$ это приближенное решение совпадает с точным решением уравнения (1).

Анализ зависимости (2) показывает, что концентрация нелетучего компонента в растворе, заполняющем поровое пространство, имеет макси-

мум вблизи устья этого пространства и с течением времени непрерывно увеличивается по всей его длине (за исключением участка порового пространства, контактирующего с подпитывающим объемом). Однако неограниченный рост концентрации нелетучего компонента вблизи устья порового пространства возможен только в случае неограниченной растворимости этого компонента, что для нелетучих веществ, способных к диссоциации (которыми являются ингибиторы коррозии технологических растворов), исключено.

Это учтено в последующих работах, посвященных математическому моделированию процесса закупорки капилляров и сквозных дефектов капиллярного типа [5, 8]. В них было принято, что рост концентрации нелетучего компонента в устье капиллярного канала ограничен концентрацией насыщения c_n этого компонента, после достижения которой происходит фазовый переход и канал закупоривается «кристаллической пробкой».

Однако из такой модели следует, что рост «кристаллической пробки» неизбежно вызывает уменьшение скорости испарения летучего компонента раствора (растворителя), а также уменьшение скорости течения раствора по капиллярному каналу ($v \neq \text{const}$), т. е. приток нелетучего компонента к устью канала за счет конвекции уменьшается. При этом диффузионный отвод нелетучего компонента вглубь канала, пропорциональный разности $(e_n - c_0)$, остается постоянным. Таким образом, должен неизбежно наступить момент, когда встречные диффузионный и конвективный потоки уравняются, и поэтому полного перекрытия капиллярного канала не произойдет.

Следовательно, указанная математическая модель не позволяет адекватно описать наблюдаемое на практике явление закупоривания сквозных дефектов стенок полых изделий «кристаллической пробкой» нелетучего компонента технологического раствора.

Выходом из противоречия, имеющегося в указанной математической модели процесса закупоривания капиллярных каналов сквозных дефектов, может послужить гипотеза о том, что спустя некоторое время от начала испарения из канала дефекта летучей составляющей технологического раствора в применисковой зоне этого канала возникает метастабильное состояние раствора, при котором рост концентрации нелетучего компонента ограничен не концентрацией насыщения этого компонента, как это было принято ранее, а критической его концентрацией $c_{кр}$, существенно превосходящей концентрацию насыщения [9, 10]. При таком состоянии раствора в применисковой зоне канала должны спонтанно образовываться различные по размерам зародыши кристаллов нелетучего компонента раствора, причем вероятность возникновения зародышей кристаллов дол-



жна быть тем большей, чем меньше размер таких зародышей. Кроме того, зародыши, меньшие некоторого критического размера, растворяются, а зародыши, размер которых превышает этот критический размер, продолжают расти.

С ростом концентрации раствора нелетучего компонента в примененной зоне сквозного канала критический размер зародышей кристаллов этого компонента должен, согласно представлениям Гиббса [10], уменьшаться, и поэтому с увеличением концентрации нелетучей составляющей раствора вероятность образования зародышей растущих кристаллов увеличивается.

Скорость процесса образования зародышей кристаллов нелетучего компонента раствора, т. е. количество зародышей N , образованных за единицу времени в единице объема раствора, определяется уравнением Аррениуса [11]:

$$N = A \exp \left[-B / (\ln C)^2 \right], \quad (3)$$

где A, B — коэффициенты пропорциональности, зависящие от условий процесса; $C = c/c_n$ — относительная концентрация или при $c \geq c_n$ — степень пересыщения раствора.

Экспоненциальный характер скорости образования зародышей кристаллов от степени пересыщения раствора обуславливает начало кристаллизации нелетучего компонента в зоне максимальной его концентрации, т. е. согласно уравнению (2) в устье капиллярного канала. Пересыщение, при котором начинается массовое образование зародышей, и рост кристаллов нелетучего компонента раствора в устье сквозного канала, обозначим как критическое $C_{кр}$. Заметим, что эта величина не постоянна и может зависеть как от условий процесса, так и от химического состава, а также текстуры поверхности стенок капиллярного канала. Обозначим $t_{кр}$ — время, при котором относительная концентрация нелетучего компонента раствора в устье капиллярного канала достигнет значения, равного $C_{кр}$. При этом будем считать, что на первой стадии процесса, т. е. при $t < t_{кр}$ концентрация нелетучего компонента в устье канала растет в соответствии с зависимостью (2).

Допустим, что при $t = t_{кр}$ в устье капиллярного канала происходит массовое образование зародышей кристаллов нелетучего компонента критического размера и более крупных зародышей кристаллов этого компонента. Предположим, что вследствие высокой степени пересыщения раствора эти зародыши быстро растут, перекрывая капиллярный канал и прерывая конвективный перенос к устью канала нелетучего компонента. Исходя из этого будем считать, что при $t = t_{кр}$ конвективный перенос нелетучего компонента прекращается полностью, т. е. $v = 0$, а период $t \geq t_{кр}$ соответствует второй стадии процесса, на которой изменение концентрации не-

летучего компонента описывается уравнением молекулярной диффузии:

$$\frac{\partial C}{\partial (t - t_{кр})} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (4)$$

начальным условием для которого является зависимость (2):

$$C(x, t) = C_0 + C_0 \left(1 + v \frac{2t_{кр}}{D} - v \frac{x}{D} \right) \exp \left(-v \frac{x}{D} \right). \quad (5)$$

Согласно работе [11], непосредственно вблизи границы раздела фаз кристалл–раствор концентрация раствора равна концентрации насыщения вещества или его равновесной концентрации. Исходя из этого, будем полагать, что в момент начала кристаллизации (при $t = t_{кр}$) концентрация нелетучего компонента в устье капиллярного канала устанавливается равной концентрации насыщения. На этом основании граничные условия для уравнения (4) можно сформулировать так:

в устье капиллярного канала:

$$C [0, (t - t_{кр})] = 1, \quad (6)$$

на входе в капиллярный канал (концентрация нелетучего компонента неизменна):

$$C [l, (t - t_{кр})] = C_0, \quad (7)$$

где l — длина капиллярного канала.

Таким образом, получаем краевую задачу I рода, описывающую поле концентрации нелетучего компонента раствора по длине капиллярного канала с неравномерным начальным распределением концентрации этого компонента и с постоянными, но разными значениями его концентрации на входе в капиллярный канал и в устье этого канала. Решение этой задачи будем искать в виде суммы:

$$C[x, (t - t_{кр})] = C_0 + (1 - C_0) \left(1 - \frac{x}{l} \right) + u[x, (t - t_{кр})]. \quad (8)$$

Здесь первые два слагаемых представляют стационарное распределение относительной концентрации нелетучего компонента, удовлетворяющее уравнению (4) при $t \rightarrow \infty$ с граничными условиями (6) и (7), а третье слагаемое — это решение уравнения:

$$\frac{\partial u}{\partial (t - t_{кр})} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (9)$$

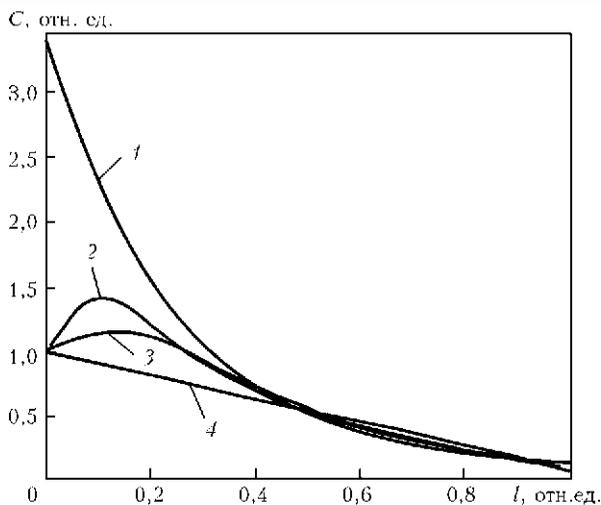
с граничными условиями:

$$u[0, (t - t_{кр})] = 0, \quad (10)$$

$$u[l, (t - t_{кр})] = 0, \quad (11)$$

и с начальным условием:

$$u(x, t_{кр}) = C_0 \left(1 + v \frac{2t_{кр}}{D} - v \frac{x}{D} \right) \exp \left(-v \frac{x}{D} \right) - \left(1 - C_0 \right) \left(1 - \frac{x}{l} \right). \quad (12)$$



Профиль распределения концентрации бихромата калия C по длине капиллярного канала сквозного дефекта l при разных значениях t . Начало координат на графике соответствует устью капиллярного канала (расчет выполнен по формулам (2) и (14) (обозн. кривых 1–4 см. в тексте)

Решение краевой задачи (9)–(12), приведенное в [12], в принятых нами обозначениях имеет вид:

$$u[x, (t - t_{кр})] = \sum_{n=1}^{\infty} \sin \mu_n \frac{x}{l} \exp \left[-\mu_n^2 \frac{D}{l^2} (t - t_{кр}) \right] \times \times \frac{2}{l} \int_0^l u(x, t_{кр}) \sin \mu_n \frac{x}{l} dx \quad (13)$$

где $\mu_n = n\pi$ — собственные числа краевой задачи.

Подставив в это выражение начальное распределение (12) и вычислив содержащийся в нем интеграл, найдем значение функции $u[x, (t - t_{кр})]$. Подставив найденное значение в выражение (8), получим:

$$C[x, (t - t_{кр})] = C_0 + (1 - C_0) \left(1 - \frac{x}{l} \right) + + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\left(1 + v^2 \frac{t_{кр}}{D} \right) \frac{\mu_n D^2 C_0}{\mu_n^2 D^2 + v^2 l^2} - \frac{2 C_0 v \mu_n D^3}{(\mu_n^2 D^2 + v^2 l^2)^2} - \frac{1}{\mu_n} (1 - C_0) \right] \times \times \sin \mu_n \frac{x}{l} \exp \left[-\mu_n^2 \frac{D}{l^2} (t - t_{кр}) \right]. \quad (14)$$

В качестве примера воспользуемся формулами (2) и (14) для расчета поля концентрации в капиллярном канале сквозного дефекта такого нелетучего компонента технологического раствора для гидроиспытаний полых изделий на прочность как бихромат калия при следующих, взятых из экспериментальной работы [4], значениях параметров: $c_H = 210 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, $c_0 = 5 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, $D = 1,8 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, $v = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, $l = 1 \cdot 10^{-2} \text{ м}$.

Результаты этих расчетов приведены на рисунке в координатах: концентрация бихромата калия C (нелетучего компонента технологического раствора

для гидроиспытаний изделий на прочность) — длина капиллярного канала сквозного дефекта l .

Кривая 1 соответствует распределению концентрации бихромата калия в капиллярном канале, рассчитанной по формуле (2) при значении $t = 1,14 \cdot 10^3 \text{ с}$. Это значение соответствует наблюдаемому в эксперименте [4] моменту начала массовой кристаллизации нелетучего компонента в устье капиллярного канала и закупорки этого канала. Пересыщение в устье капиллярного канала в этот момент составляет $C = 3,4$. Поскольку это момент начала процесса массовой кристаллизации бихромата калия, можно считать, что для данных условий эксперимента $C_{кр} = 3,4$, а $t_{кр} = 1,14 \cdot 10^3 \text{ с}$. Кривые 2–4 соответствуют распределению концентрации бихромата калия по длине капиллярного канала на втором этапе процесса, когда это распределение описывается формулой (14). Кривая 2 соответствует значению $(t - t_{кр}) = 5,50 \cdot 10^4 \text{ с}$, кривая 3 соответствует $(t - t_{кр}) = 1,65 \cdot 10^5 \text{ с}$, а прямая 4 — стационарному распределению концентрации нелетучего компонента при $t > 1,00 \cdot 10^6 \text{ с}$. Характер кривой 2 соответствует нашему допущению, согласно которому в момент начала процесса кристаллизации нелетучего компонента в устье капиллярного канала концентрация этого компонента раствора вблизи растущих зародышей кристаллов снижается до равновесного значения. Отметим, что градиент концентрации бихромата калия в зоне, расположенной вблизи устья капиллярного канала, положителен. Это свидетельствует о поступлении бихромата калия в зоны роста его кристаллов и, следовательно, о продолжающемся росте кристаллов нелетучего компонента.

Кривая 3 свидетельствует о постепенном сглаживании поля концентрации бихромата калия в капиллярном канале и о том, что при $(t - t_{кр}) \approx 1,65 \cdot 10^5 \text{ с}$ градиент концентрации бихромата калия вблизи устья такого канала $\frac{\partial c}{\partial l} \rightarrow 0$, т. е. рост кристаллической пробки в канале прекращается. Очевидно, что при $(t - t_{кр}) > 1,65 \cdot 10^5 \text{ с}$ градиент концентрации бихромата калия в капиллярном канале $\frac{\partial c}{\partial l} < 0$, что соответствует началу растворения «кристаллической пробки».

Кривая 4 соответствует процессу растворения выпавших ранее кристаллов бихромата калия в устье капиллярного канала. Очевидно, что этот процесс будет продолжаться до полного или частичного растворения «кристаллической пробки» в капиллярном канале и, как следствие, возобновления конвективного потока. При частичном растворении кристаллической пробки нелетучего компонента технологического раствора и возоб-



новлении конвективного потока этого компонента вторичное закупоривание капиллярного канала маловероятно вследствие присутствия в растворе вблизи применимой зоны канала готовых центров кристаллизации нелетучего компонента, т. е. отсутствия условий для возникновения концентрации пересыщения этого компонента.

Выводы

Полученные результаты имеют качественный характер не только в силу допущений, сделанных при выводе математической модели, а главным образом потому, что из-за неопределенности геометрических параметров каждого конкретного сквозного дефекта изделия, а также химического состава и текстуры поверхности стенок канала такого дефекта не представляется возможным наперед задать и использовать в расчетах конкретные значения как скорости v движения технологического раствора по каналу дефекта (скорости конвективного переноса нелетучего компонента раствора), так и значение критического пересыщения $C_{кр}$ этого раствора в устье дефекта, при котором должно произойти массовое образование зародышей кристаллов нелетучего компонента и следует ожидать перекрытия дефекта.

В то же время анализ полученных результатов позволяет сделать несколько практически полезных выводов.

Во-первых, время проведения гидравлических испытаний полых изделий на прочность должно быть меньше времени, необходимого для образования в каналах сквозных дефектов стенок изделий «кристаллической пробки» нелетучего компонента технологического раствора.

Во-вторых, в качестве ингибиторов коррозии конструкционных материалов изделий в состав технологических растворов следует вводить нелетучие компоненты, которые характеризуются максимальной растворимостью.

В-третьих, в случае совмещения испытаний полых изделий на прочность с испытаниями их на герметичность с использованием технологических растворов и химических средств локализации мест

утечек растворов через сквозные дефекты такие средства локализации дефектов целесообразно наносить на внешнюю поверхность изделия до заполнения его полости технологическим раствором. При этом желательно, чтобы химические средства локализации дефектов, изменяющие окраску при реакции с нелетучим компонентом раствора [3] после нанесения на поверхность изделия образовывали пленки, проницаемые для воздуха, выходящего из канала дефекта в процессе его капиллярной пропитки технологическим раствором, и, в то же время, были непроницаемы для летучей составляющей этого раствора — воды.

1. *Технология сборки и испытаний космических аппаратов* / Под общ. ред. И. Т. Белякова, И. А. Зернова, Е. Г. Антонова и др. — М.: Машиностроение, 1990. — 352 с.
2. *Герметичність у ракетно-космічній техніці* // Ф. П. Санін, Є. О. Джур, Л. Д. Кучма, В. А. Найдюнов. — Дніпропетровськ: Вид-во Дніпропетров. держ. ун-ту, 1995. — 168 с.
3. *Бударин Л. И., Касаев К. С., Наумов В. Н.* Химические методы испытаний изделий на герметичность. — Киев: Наук. думка, 1991. — 304 с.
4. *Кристалізація біхромату калію в одноканальному скляному капілярі* / К. Б. Яцимирський, Л. І. Бударін, А. Ф. Верлань та ін. // Доп. Академії наук Української РСР. Серія Б. — 1982. — № 8. — С. 54–57.
5. *Старов В. М., Чураев Н. В.* Особенности кинетики роста кристаллов в устье капилляров при испарении растворов // Инж.-физ. журн. — 1988. — 54, № 4. — С. 635–640.
6. *Jacson F. L., Krause F. P.* Diffusion controlled buildup of surface active material at the air-water interface during evaporation // The J. of Physical Chemistry A. — 1963. — 67, № 11. — P. 2355–2360.
7. *Афанасьев А. Е., Гамаюнов Н. И., Чураев Н. В.* Влияние диффузии на перенос радиоактивной метки при испарении влаги из пористых тел // Коллоидный журн. — 1971. — № 1. — С. 11–17.
8. *Исследование процессов концентрирования смесей в сквозных дефектах капиллярного типа методом численного эксперимента: Препр.* / АН УССР. Ин-т проблем моделирования в энергетике. — Киев, 1996. — 34 с.
9. *Грушевский В. П.* Возникновение кристаллической фазы в жидкостях. — Киев: Сб. науч. работ лаборатории металлфизики АН УССР, 1948. — С. 95–124.
10. *Гиббс Дж.* Термодинамические работы. — ГИТТЛ, 1950. — 492 с.
11. *Степин Б. Д.* Методы получения особо чистых неорганических веществ. — Л.: Химия, 1969. — 480 с.
12. *Лыков А. В.* Теория теплопроводности. — М.: Высш. шк., 1967. — 600 с.

Поступила в редакцию
24.05.2012

ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРИВОДНЫХ ЗУБЧАТЫХ МЕХАНИЗМОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА УДАРНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧАХ

Н. Н. ИШИН, А. М. ГОМАН, А. С. СКОРОХОДОВ, кандидаты техн. наук (Объединен. ин-т машиностроения НАН Беларуси), С. А. ГАВРИЛОВ, инж. (ДИП «Полтава-БелАЗ-сервис», Украина)

Предложена методология оценки технического состояния редукторных систем большегрузных самосвалов с электротрансмиссией, базирующаяся на мониторинге их вибрационных характеристик в процессе эксплуатации.

A procedure is proposed for assessment of the technical condition of reduction gear systems of large trucks with electric transmission, based on monitoring of their vibrational characteristics in service.

Постановка задачи. Основным источником вибраций и динамических нагрузок в трансмиссиях мобильных машин и приводных зубчатых механизмах являются зубчатые передачи. Импульсные ударные взаимодействия, возникающие при пересопрежении зубчатых передач, характеризуются малой длительностью, значительными силами взаимодействия, большими градиентами напряжений. Ударно-контактные взаимодействия существенно влияют на надежность и ресурс приводных зубчатых механизмов.

Методы вибрационной диагностики, характеризующиеся повышенной чувствительностью к различным отклонениям параметров технического состояния зубчатого зацепления от нормы, являются весьма перспективными для решения задач оценки надежности и прогнозирования остаточного ресурса работоспособности передач зацеплением по контактной выносливости и износу.

Эффективный анализ технического состояния зубчатых механизмов может быть проведен при условии, что известны форма ударного импульса сопрягаемых зубьев и длительность процесса соударения. Эти параметры импульса определяются с помощью контактной теории удара [1, 2].

В этой связи основной задачей исследования является определение параметров ударных импульсов, взаимосвязанных с техническим состоянием зубчатого зацепления, по генерируемым механизмом вибрациям и создание на этой базе методико-инструментальных средств оценки технического состояния трансмиссионных узлов машин.

Удар прямозубых зубчатых колес при первоначальном контакте зубьев вдоль образующих. Для решения задачи удара прямозубых зубчатых колес принята динамическая модель (рис. 1), учитывающая только крутильные колебания колес (обобщенные координаты φ_1, φ_2) относительно равномерного вращения зубчатых колес с пос-

тоянной угловой скоростью, вызванные погрешностями изготовления и сборки зубчатых колес. При этом предполагается, что внешние крутящие моменты: приложенный к ведущей шестерне движущий момент и действующий на ведомое колесо момент сопротивления — уравновешены моментами окружных сил, приложенных к зубчатым колесам в зоне сопряжения.

Дифференциальное уравнение, устанавливающее связь между ударной силой F и ускорением зубьев $\frac{d^2x_3}{dt^2}$ в их относительном движении в процессе удара имеет вид:

$$\frac{d^2x_3}{dt^2} = -\frac{F}{\mu_{\text{пр}}},$$

где x_3 — сближение зубьев вследствие местного сжатия в зоне контакта в произвольный момент времени t ; $\mu_{\text{пр}}$ — приведенная масса колес зубчатой передачи.

С математической точки зрения рассматриваемая задача совпадает с задачей удара двух круговых цилиндров с радиусами ρ_1, ρ_2 , оси которых параллельны и движутся с относительной скоростью V_0 , направленной по нормали к их осям.

Расчеты показали, что с достаточно большой степенью точности в первом приближении можно

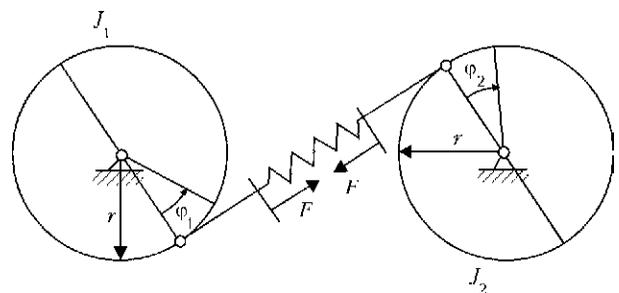


Рис. 1. Динамическая схема зубчатой передачи



принять форму ударного импульса (закон изменения ударной силы во времени) взаимодействующих зубчатых передач, описываемую синусоидой:

$$F = F_{\max} \sin \omega_3 t = V_0 \sqrt{\frac{\mu_{\text{пр}}}{\delta_{\text{к.ср}}}} \sin \omega_3 t,$$

где $\delta_{\text{к.ср}}$ — среднее значение функции контактной податливости сопрягаемых зубьев при изменении величины ударной силы от нулевого значения до максимального; ω_3 — собственная частота зубчатой передачи.

Приближенное значение времени действия ударной силы будет:

$$T^{\text{пр}} = \pi / \omega_3.$$

В зубчатой передаче периодическое действие ударных импульсов происходит с периодом T_z зубчатой частоты (рис. 2, а).

Приведенный на рис. 2, б спектр периодических ударных импульсов позволяет при сопоставлении со спектром реального вибрационного сигнала механизма выявить те гармонические составляющие, кратные зубчатой частоте, которые совпадают с областью резонанса механизма и возбуждают в нем интенсивные колебания. По изменениям величин этих составляющих в процессе эксплуатации можно судить о мере повреждения зубчатой пары.

Проведенные исследования показали, с одной стороны, что амплитуда ударного импульса значительно зависит от величины погрешности шага зацепления сопряженной пары зубьев, с другой — появление в зубе трещины или питтинга существенно влияет на контактную жесткость сопряженной пары зубьев, что приводит к изменению величины амплитуды и времени действия ударного импульса. Это позволяет оценивать техническое состояние зубчатой пары по критериям контактной выносливости и износа.

Практическое использование. Трансмиссионные системы автотракторной техники работают, как правило, в условиях постоянно меняющихся ско-

ростей и нагрузки. В таких условиях анализ вибраций с помощью серийной вибродиагностической аппаратуры зачастую оказывается недостаточно эффективным. Поэтому нами была создана оригинальная бортовая система вибромониторинга редукторов мотор-колес (РМК) самосвала, позволяющая в условиях карьерной эксплуатации машины постоянно отслеживать техническое состояние редукторов и своевременно предупреждать водителя о предаварийном состоянии РМК.

Ухудшение состояния контактирующих поверхностей кинематических пар сопровождается ростом амплитуд ударных импульсов, а также спектральных составляющих практически во всем частотном диапазоне вибросигнала, но каждая из пар характеризуется своими частотами возбуждения. Для зубчатой пары это частота вращения вала и зубчатая частота, каждая из которых является образующей для целого гармонического ряда частот. Таким образом, в вибрационном спектре передач зацеплением существует ярко выраженный гармонический ряд, амплитуды которого при этом являются компонентами n -мерного вектора диагностических признаков технического состояния i -го узла механизма. Такой вектор-признак аккумулирует информацию о поведении диагностируемой передачи с учетом перераспределения колебательной энергии между компонентами гармонического ряда [3].

На рис. 3 показаны отдельные, полученные с помощью созданной бортовой системы вибромониторинга, гармонические спектры валов первой ступени РМК БелАЗ. На всех спектрах присутствуют ряды гармоник, характеризующие диагностируемые элементы, в данном случае зубчатые колеса. На рис. 3, а это гармоники 21, 42, 63 и 84 частоты f_z солнечной шестерни с числом зубьев $z = 21$, и кратных ей частот $2f_z$, $3f_z$ и $4f_z$. Соответственно, для сателлитов с числом зубьев $z = 47$ это гармоники 47, 94, 141 и 188 (рис. 3, б).

Полученные гармонические спектры позволяют либо отслеживать изменение амплитуды S соответствующей гармоники на характерных частотах в зависимости от наработки механизма, либо

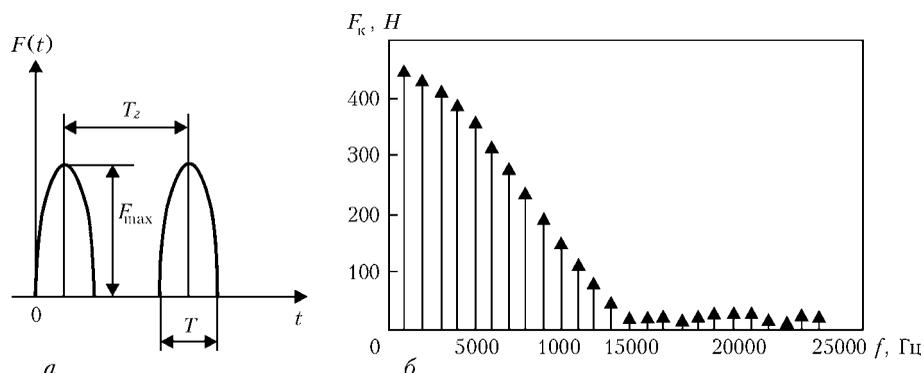


Рис. 2. График (а) и спектр периодических синусоидальных ударных импульсов (б)

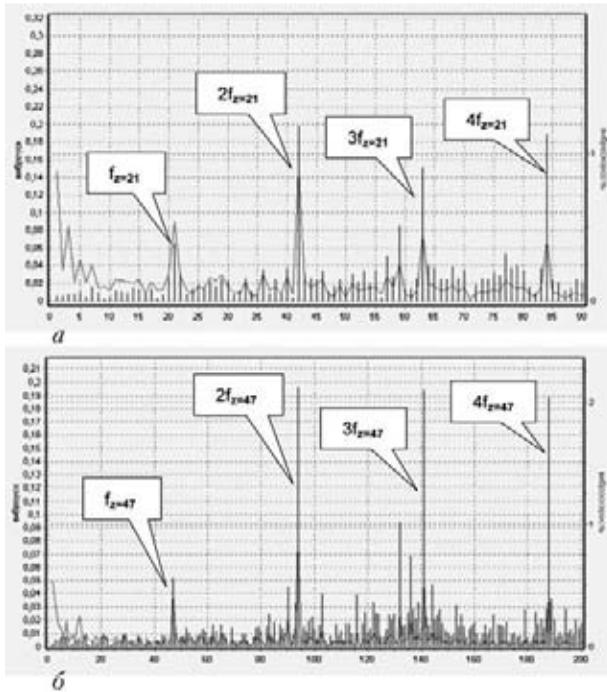


Рис. 3. Гармонические спектры валов планетарного ряда РМК: а — солнечной шестерни; б — сателлитов

формировать из амплитуд гармонических составляющих комплексные критерии — безразмерные дискриминанты. Например, для характеристики процесса изнашивания зубьев применяется дискриминант вида:

$$\beta_H = \frac{\sum_{n=2}^N S_{nf_z}}{S_{f_z}}$$

Изменение величины дискриминанта, выбранного на основании аналитических исследований, $\beta_{f_z} = (S_{f_z} + S_{2f_z})^{1/2}$ и содержащего амплитуды двух первых гармоник зубчатой частоты коронной шестерни для редуктора без дефектов, а также после появления в процессе эксплуатации самосвала скола зуба на указанной шестерне показано на рис. 4.

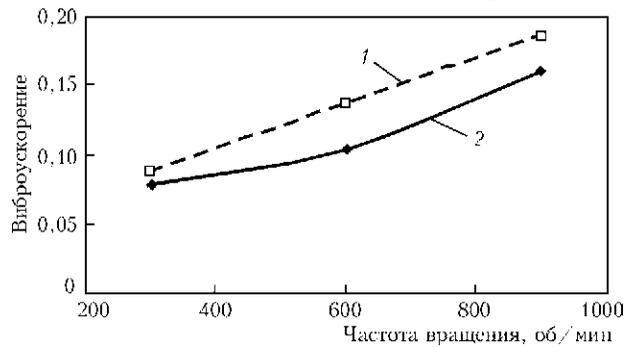


Рис. 4. Зависимость дискриминанта β_{f_z} от частоты вращения ведущего вала для дефектного (1) и бездефектного редукторов (2)

Выводы

Результаты теоретических исследований положены в основу создания методических и инструментальных средств вибромониторинга редукторов мотор-колес самосвалов БелАЗ. Созданная бортовая автоматизированная система безразборной оценки технического состояния РМК предназначена для своевременного предупреждения в условиях карьерной эксплуатации машины о предаварийном состоянии РМК для исключения ситуаций, связанных с аварийным выходом из строя, а также для повышения сроков службы и эксплуатационной надежности техники, перехода от планово-предупредительного обслуживания машин к обслуживанию по фактическому состоянию, снижения времени простоя самосвалов, сокращения затрат на их обслуживание и ремонт.

В настоящее время системы вибромониторинга редукторов мотор-колес проходят апробацию на самосвалах БелАЗ в карьере Полтавского ГОК (Украина).

1. Павлов Б. В. Акустическая диагностика механизмов. — М.: Машиностроение, 1971. — 220 с.
2. Бидерман В. Л. Теория механических колебаний. — М.: Высш. шк., 1980. — 408 с.
3. Расчетно-экспериментальный метод прогнозирования остаточного ресурса зубчатых передач / Н. Н. Ишин, А. М. Гоман, А. С. Скороходов, М. К. Натурьева // Авто-моб. пром-сть. — 2010. — № 11. — С. 20–23.

Поступила в редакцию
11.04.2012



АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ПРОЦЕССА СТРУЙНОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

Н. С. ПРЯДКО, канд. техн. наук (Ин-т технической механики НАН и ГКА Украины)

Проведен анализ особенностей применения акустико-эмиссионной диагностики к процессу струйного измельчения сыпучих материалов. Выявлены основные информативные параметры, взаимосвязь акустических и технологических параметров. Предложены пути контроля и оптимизации процесса измельчения на основе информационной технологии.

The analysis of specific application of acoustic mission diagnostics for jet crushing process of loose materials is carried out. The basic informative parameters, interrelation of acoustic and technological parameters are revealed. Ways of the crushing process control and optimization are offered on the basis of informational technology.

Разрушение частиц в процессе струйного измельчения сыпучего материала можно представить как преобразование случайных микроповреждений в некоторый регулярный процесс. Для этого необходимо рассматривать взаимосвязь моделей двух уровней: микроуровня (микроповреждение), на котором разрушение связей между элементами материала носит стохастический характер, и макроуровня (измельчение материала), определяющего процесс измельчения частиц в потоке энергоносителя.

Исследования процесса микроразрушения материала сжатием и другими видами нагружения [1–4] показали, что одним из наиболее чувствительных эффектов, характеризующих микроповреждение, является эффект акустической эмиссии (АЭ). Он связан с излучением упругих волн твердым телом вследствие внутренней динамической перестройки его структуры. Отмечено, что закономерности АЭ наблюдаются при различных видах повреждений: от образования микротрещин при одноосных нагружениях образцов, разрыве волокон композитных материалов до сдвига пласт земной коры и землетрясений [3, 5, 6].

Процесс измельчения в противоточных струях мельницы является особым видом разрушения материала. Главное отличие — в способе воздействия на частицы. Околосвуковыми струями энергоносителя (газа) частицы захватываются и выносятся через эжектируемое устройство в помольную камеру навстречу друг другу. Более подробно этот процесс рассмотрен в работе [7]. При столкновении частицы накачиваются энергией от энергоносителя, подвергаются удару, и, наконец, диспергируют. При этом аппаратура фиксирует акустические сигналы. Диспергирование является завершающим актом разрушения. В его эффектах проявляются все детали механизма разрушения, включая образование и развитие трещин.

Цель данной работы — исследовать особенности применения АЭ метода для контроля и оп-

тимизации процесса струйного измельчения сыпучих материалов.

Согласно модели деформируемого твердого тела [8] предразрушающее состояние включает три стадии: стационарную — квазипериодические релаксационные (разрывные) колебания, ускоренную — стохастические автоколебания и третью неустойчивую — авторезонансные колебания. Соотношения между длительностями стадий выглядят как $t_1:t_{11}:t_{111} = 1:10^{-3}:(10^{-3} \dots 10^{-6})$, продолжительность стационарной стадии примерно на три порядка превышает общую продолжительность двух других стадий [9].

Применительно к процессу струйного измельчения первая стационарная стадия (макродвижение) включает загрузку струй материалом, накачку энергией частиц в ходе продвижения двухфазного потока (газа и твердых частиц) в помольную камеру. В результате столкновения в зоне измельчения частицы переходят на вторую стадию разрушения, а затем наступает третья стадия, в результате которой происходит диспергирование частиц. По современным представлениям диспергирование — это процесс разделения деформируемого твердого тела на изолированные участки в активных локальных зонах вблизи дефектов структуры по достижении критического (предельного) состояния вещества на неустойчивой авторезонансной стадии предразрушения под действием акустических волн, возникающих при автоколебательном движении атомов в этих зонах. Частицы разрушаются в зоне измельчения полностью до необходимых размеров, удаляются после классификации в циклон готового продукта или разрушаются частично, тогда они поступают после классификации на повторное измельчение. Из авторезонансной модели диспергирования следует, что информацию об энергетике процесса несет запредельная стадия деформирования и разрушения, в частности, стадия саморазрушения, протекающая со скоростью авторезонанса. В этой связи

стадия запредельного деформирования представляется в виде трех составляющих: 1) разрушение с микродиспергированием; 2) саморазрушение с быстрой разгрузкой напряжений и макродиспергированием; 3) разрушение с пластическим деформированием и дроблением.

Первую стадию струйного измельчения можно рассматривать на основе стохастического подхода, процесс перемещения частиц в помольной камере тогда представляется как случайное блуждание при диффузии и броуновском движении [10]. Вторая и третья стадии разрушения частиц при газоструйном измельчении являются микро-разрушениями, которые необходимо рассматривать с позиций кинетической теории разрушения твердых тел, основы которой сформулированы в работах С. Н. Журкова и др. [11].

Метод АЭ как средство АЭ мониторинга может служить основой исследования разрушения материалов при газоструйном измельчении. Но для этого необходимо определить взаимосвязь акустических параметров, АЭ-критериев и режимов, технологических параметров процесса.

Основные параметры АЭ (ГОСТ 27655–88) — это число импульсов за время наблюдения N_x и активность N_p , равная количеству импульсов за некоторый интервал наблюдения (обычно 0,1 с или 1 с). Фактически регистрируют не все импульсы АЭ, а лишь превышающие некоторый порог N_{min} . Тогда параметры эмиссии обозначают: суммарный счет N и скорость счета N . Для характеристики процесса важно не только количество импульсов, но и их амплитуда. В результате экспериментальных исследований [12–15] были выявлены информативные параметры АЭ мониторинга процесса измельчения:

- число импульсов АЭ за весь период наблюдения. Этот критерий отражает степень измельчения, однако он несет информацию только в случае одного вида разрушения, что не соответствует процессу струйного измельчения;

- число импульсов на отдельных участках процесса измельчения. Эта характеристика наиболее подходящая для описания процесса, однако для удобства обращения с массивами данных необходимо рассматривать небольшие участки. В этом случае есть вероятность пропустить какую-то особенность процесса в момент записи файла данных;

- распределение сигналов АЭ по амплитуде. Это наиболее изученная характеристика сигналов акустического мониторинга процесса измельчения [12–14]. Было установлено, что величина амплитуды АС изменяется в зависимости от крупности частиц, содержащихся в струе, и от технологической стадии измельчения (загрузка струй материалом, рабочий режим измельчения, разгрузка мельницы), причем на стадии загрузки сред-

няя и максимальная величина амплитуд отличается на порядок, тогда как в рабочем режиме и на стадии разгрузки это различие уменьшается до двух-трех раз;

- активность АЭ, т. е. отношение числа импульсов АЭ к интервалу времени наблюдения. Повышение уровня акустической активности зоны помола ($\lg N$ от 4 до 5,5) на любой стадии является фактором роста числа ударов частиц и, следовательно, интенсификации измельчения и увеличения производительности мельницы.

Испытания проводили на экспериментальных стендах «УСИ-20», «УСИ-02», включающих мельницы типоразмера 20 и 2 кг/ч, соответственно. Эти установки включали бункер загрузки, струйную мельницу, классификатор, циклон, систему подачи и очистки энергоносителя (воздуха), бункер для готового продукта. Для проведения акустико-эмиссионного мониторинга разработана аппаратная система с волноводами, пьезокерамическими широкополосными датчиками, установленными внутри мельницы и в трубопроводе на выходе из классификатора, аналогоцифровым преобразователем, связанным с компьютером (рис. 1, 2).

Исходя из физической сути процесса струйного измельчения были выделены и изучены четыре режима. Начало загрузки струй материалом характеризует режим 1, в котором ускорение частиц и их взаимные соударения происходят в условиях высокой концентрации частиц твердой фазы в струе и при относительно низких скоростях разрушения (механизм динамического истирания). По мере удаления частиц из газозвеси (через систему классификации в циклон и фильтр) уменьшается насыщенность струй твердой фазой, измель-

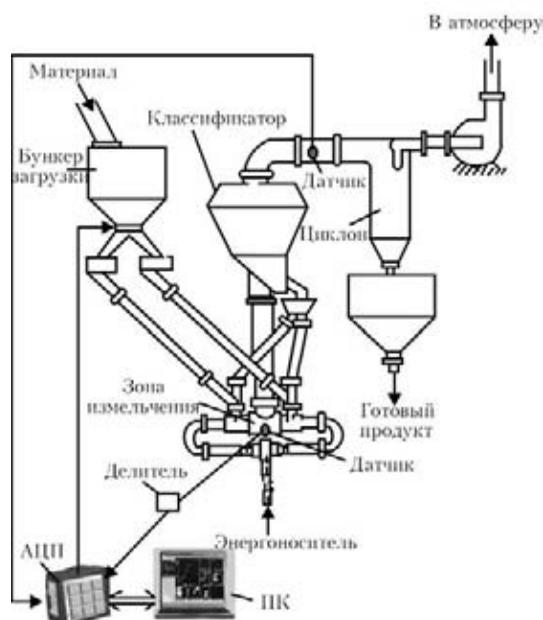


Рис. 1. Схема измельчительной установки



Рис. 2. Лабораторная установка УСИ-20 с АЭ мониторингом производительностью 20 кг/ч

чение становится устойчивым и более эффективным за счет перехода к оптимальным концентрациям и более высокой скорости разрушения частиц (механизм высокоскоростного удара). Это оптимальный рабочий режим 2. Далее, если не производится подача материала в струю, процесс переходит в режим разгрузки — режим 3 с сохраняющейся достаточно высокой скоростью разрушения частиц ударами, но недостаточной концентрацией твердой фазы. В этом режиме измельчение происходит уже недостаточно эффективно из-за пониженной вероятности встречных ударов частиц в зоне помола. В процессе измельчения возможен режим 4 — режим перегрузки струй материалом, за которым может наступить «завал» помольной камеры в результате уменьшения относительной скорости разгона и разрушения частиц. В этом режиме наблюдается резкое снижение эффективности измельчения и производительности мельницы.

Исследования позволили установить связь акустических параметров с режимами измельчения. Изменение режима струйного измельчения, включая подачу в струю материала, различные состояния струй по содержанию твердой фазы и динамичности разрушения частиц, обуславливают изменения амплитудных распределений и активность акустических сигналов в зоне помола. Этот факт может служить основой управления процессом измельчения и достижения оптимального ре-

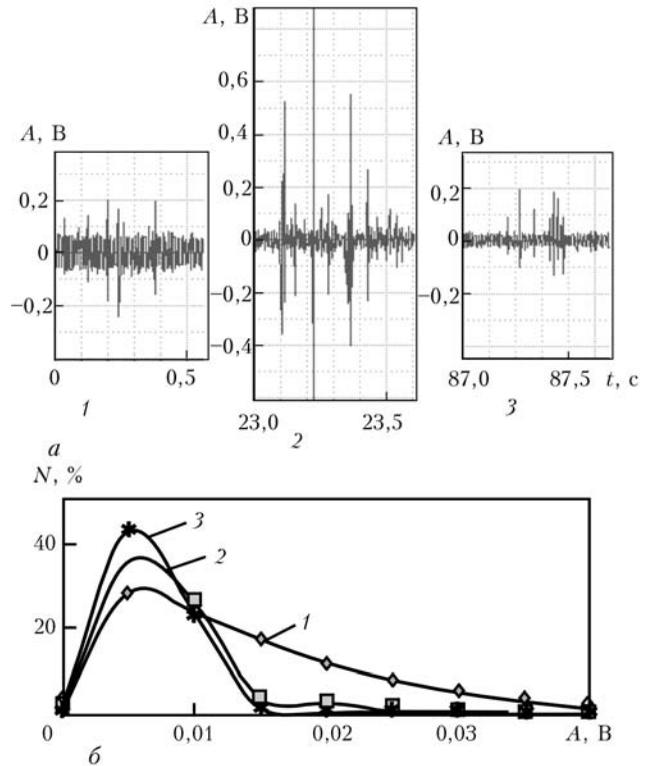


Рис. 3. Кинетика амплитуд (а) и активности (б) акустических сигналов в зоне измельчения на различных стадиях процесса (1 — загрузка; 2 — рабочий режим; 3 — разгрузка)

жима, т. е. оптимальной загрузки струй материалом. На рис. 3 показаны акустические сигналы и их активность, записанные на различных стадиях измельчения цирконового концентрата при давлении энергоносителя $P = 0,3$ МПа, режиме классификации (числе оборотов ротора классификатора) $n = 2000$ мин⁻¹.

Признаком возрастающего эффекта диспергирования при прочих равных условиях является увеличение доли малоамплитудных АС (менее 40 мВ) в измеряемом числе АС (рис. 4).

На рис. 4 прослеживается корреляционная полулогарифмическая связь дисперсности $S_{уд}$ продуктов струйного измельчения и активности $N(A_{40})$ появления акустических сигналов с амплитудой менее 40 мВ. Чем выше эффект диспергирования, тем весомее доля малоамплитудных АС. В частности, рост $S_{уд}$ примерно от 2000 до

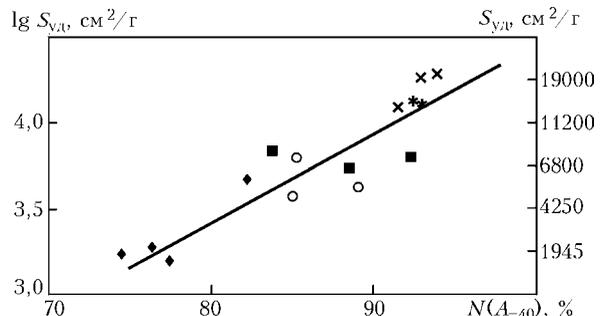


Рис. 4. Связь параметра дисперсности $S_{уд}$ продукта и доли $N(A_{40})$ малоамплитудных сигналов (менее 40 мВ)

19000 см²/г приводит к увеличению $\dot{N}(A_{40})$ от 75 до 94 %.

На рис. 5 показано изменение счета АС за одну секунду в зависимости от величины амплитуды сигналов при получении продуктов различной удельной поверхности в диапазоне от 2000 до 19000 см²/г (1, 2 — шамот с разной удельной поверхностью: $S_{уд}^1 = 1724$ см²/г, $S_{уд}^2 = 4850$ см²/г; 3 — газовый уголь, $S_{уд} = 18827$ см²/г)

Из рисунка видно преимущественное накопление амплитуд весьма малой величины — менее 0,04 В. При получении порошков более высокой дисперсности ($S_{уд} > 5000$ см²/г) наблюдается практически полное исчезновение сигналов с амплитудой выше 0,08...0,1 В. Эта закономерность может стать акустическим признаком достижения необходимой дисперсности продукта измельчения и критерием управления качеством измельченного продукта.

К перечисленным параметрам АЭ следует отнести относительные АЭ-критерии, которые связаны с процессом измельчения. Критерием оценки соответствия процесса оптимальным условиям измельчения может служить условный коэффициент эффективности $K_3 = Q/\lg N$ (г/имп), характеризующий отношение производительности G мельницы к соответствующей активности (в виде логарифма) N АЭ в зоне помола (рис. 6). В рабочих режимах струйной мельницы ($Q = 1,6...5,5$ г/с) величина K_3 изменяется в пределах 0,3...1,5. Изменение Q для одного и того же материала обусловлено отклонением насыщенности струй твердой фазой от оптимального уровня. Экспериментальными исследованиями установлено [16], что величина K_3 связана обратно пропорциональной зависимостью с показателем $\lg N$ степени активности АЭ для процесса измельчения.

Критерием, связывающим производительность и акустические параметры, является коэффициент циркуляции, определяемый как $K_{ц} \approx N/N_{загр}$. Экспериментальные исследования показали, что максимальная производительность мельницы

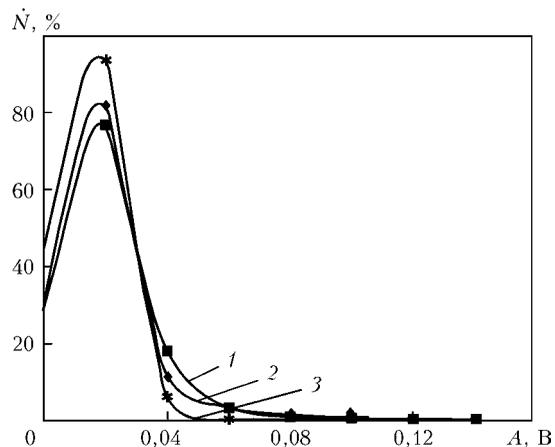


Рис. 5. Активность и амплитуда АС рабочей зоны струйной мельницы при получении порошков различной удельной поверхности (обозначения 1–3 см. в тексте)

обеспечивается в условиях приближения величины коэффициента циркуляции материала к единице. В двух других граничных состояниях загрузки струй этот коэффициент значительно меньше единицы (разгрузка) и при неоптимальных режимах (перегрузка, загрузка) величина коэффициента порядка 2 (см. рис. 7, д).

Таким образом, основу АЭ мониторинга струйной мельницы составляет закономерность изменения акустической активности и амплитуды АС в зависимости от технологических показателей количества и качества измельченного продукта, т. е. $F(A, N) = f(G, S_{уд}, K_3, K_{ц})$. Схематическое поведение основных информативных параметров показано на рис. 7.

Процесс рассматривался при постоянных параметрах энергоносителя ($P = 0,3$ МПа) и режима классификации ($n = 600$ мин⁻¹). Режимы, характеризующие различные состояния загрузки струй материалом обозначены следующими интервалами: $t_1 t_2$ — загрузка материала массой m_1 и выход на рабочий режим измельчения; $t_2 t_3$ — оптимальный режим измельчения с наилучшей производительностью (в период $t_{эф}$); $t_3 t_4$ — загрузка материала массой $m_2 > m_1$ с некоторой перегрузкой

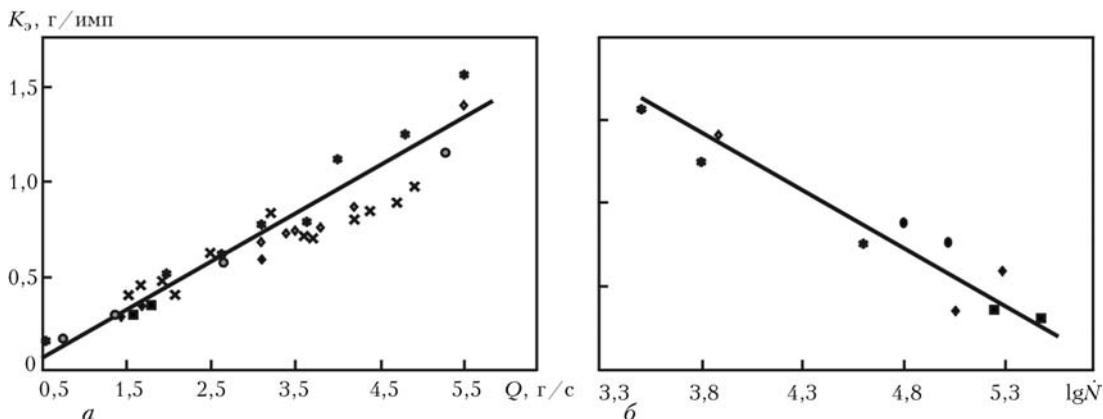


Рис. 6. Зависимость показателя акустической эффективности K_3 струйного измельчения от производительности Q (а) и активности АС (б)

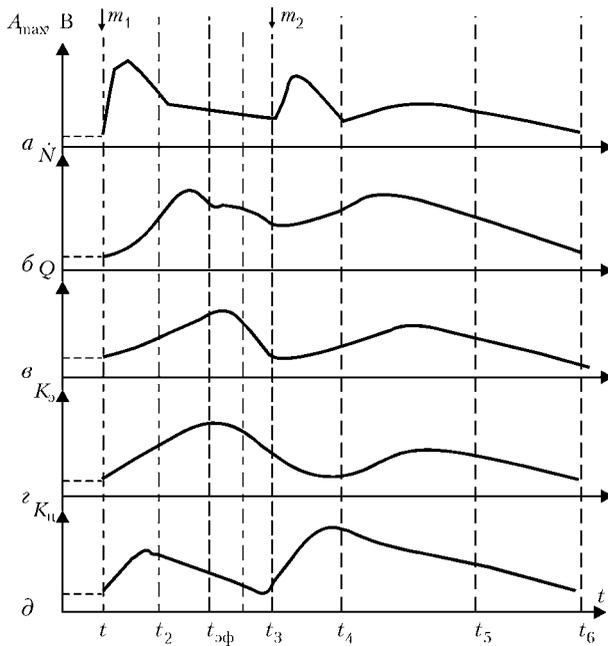


Рис. 7. Схематическое изображение информативных акустических и технологических параметров процесса струйного измельчения (описание *a–d* см. в тексте)

струй; t_4t_5 — рабочий режим; t_5t_6 — разгрузка струй.

Полученные коэффициенты K_3 и $K_{ц}$ (рис. 7, *z*, *d*) отражают разные аспекты (эффективность и кратность циркуляции) процесса измельчения. Эксперименты показали, что величина K_3 должна быть больше 0,4 для исключения неэффективной работы мельницы. В оптимальном режиме измельчения показатель K_3 достигает 0,8...0,9 (для шамота, см. рис. 7, *в*, *z*). Коэффициент циркуляции зависит от степени наполнения струй материалом. В условиях оптимальной работы мельницы этот коэффициент является величиной порядка единицы, тогда как в условиях переполнения струй составляет величину порядка 2-4, а при их чрезмерной разгрузке — меньше 1 (рис. 7, *d*).

В ходе экспериментальных исследований собрана база данных (БД) основных эталонных характеристик процесса струйного измельчения различных материалов. Далее материалы были обработаны, занесены в специальную БД в виде, пригодном для использования в технологии нейронных сетей. Состояние системы струйного измельчения описывается изменением не отдельных параметров, а вектором состояния, включающим информативные параметры процесса. Так, в БД внесены давление P и температура T энергоносителя, число оборотов n двигателя классификатора, плотность ρ материала, исходная крупность d_0 материала, усредненная крупность полученного материала d и акустические параметры мониторинга процесса — амплитуда A , частота ω , активность N акустических сигналов. При этом сле-

дует отметить, что некоторые параметры типа α , β задаются заранее для группы материалов, другие параметры (P , n , T) — технологические условия измельчения связаны с требуемыми техническими условиями измельчения. Таким образом, вектор состояния процесса струйного измельчения может быть представлен в виде $\vec{X} = \{P, T, n, \alpha, \beta, Q, A, N, \omega\}$.

Используя созданную БД параметров состояния проведено математическое моделирование процесса на базе нейронной сети вида множественной логистической регрессии [17]. Для обучения нейронной сети использовали метод обратного распространения погрешности. Система была обучена и протестирована на селективной выборке процесса струйного измельчения, оценку адекватности модели проводили с помощью ROC-анализа.

На основе результатов АЭ мониторинга и нейросетевого моделирования разработана информационная технология процесса струйного измельчения. Для ее создания использовался комплексный подход, включающий несколько этапов: формирование БД и баз знаний, планирование и подготовка акустического мониторинга, интеллектуальный анализ результатов, выбор стратегии измельчения. Общий вид информационной технологии струйного измельчения представлен на рис. 8.

Информационная технология струйного измельчения является интеллектуальной системой оценки состояния процесса со всеми необходимыми функциями [18]. В рамках непрерывного АЭ мониторинга реализуется измерение, обработка текущих акустических параметров процесса, сравнение с эталонными параметрами из БД, диагностика состояния процесса и возможных путей продолжения процесса, выбор оптимального варианта и принятие решения. На последнем этапе осуществляется анализ результатов, на основе которого выдаются рекомендации по дальнейшему ходу процесса измельчения — продолжать измельчение, добавлять материал в струи, корректировать параметры измельчения или полностью прекращать процесс. Эффективность применения нейросетевой технологии заключается не только в качественной первичной обработке данных АЭ мониторинга, выделении сигналов из шума [19], но и в способности распознать, классифицировать новые сигналы, принимаемые датчиком. Обученная нейронная сеть, сохраняя все сведения БД об информативных параметрах струйного измельчения и их взаимосвязи, может правильно идентифицировать состояние процесса на основе экспериментальных данных АЭ мониторинга и выбрать оптимальное решение.

Вывод

Проведенные исследования процесса струйного измельчения на основе АЭ мониторинга позволили

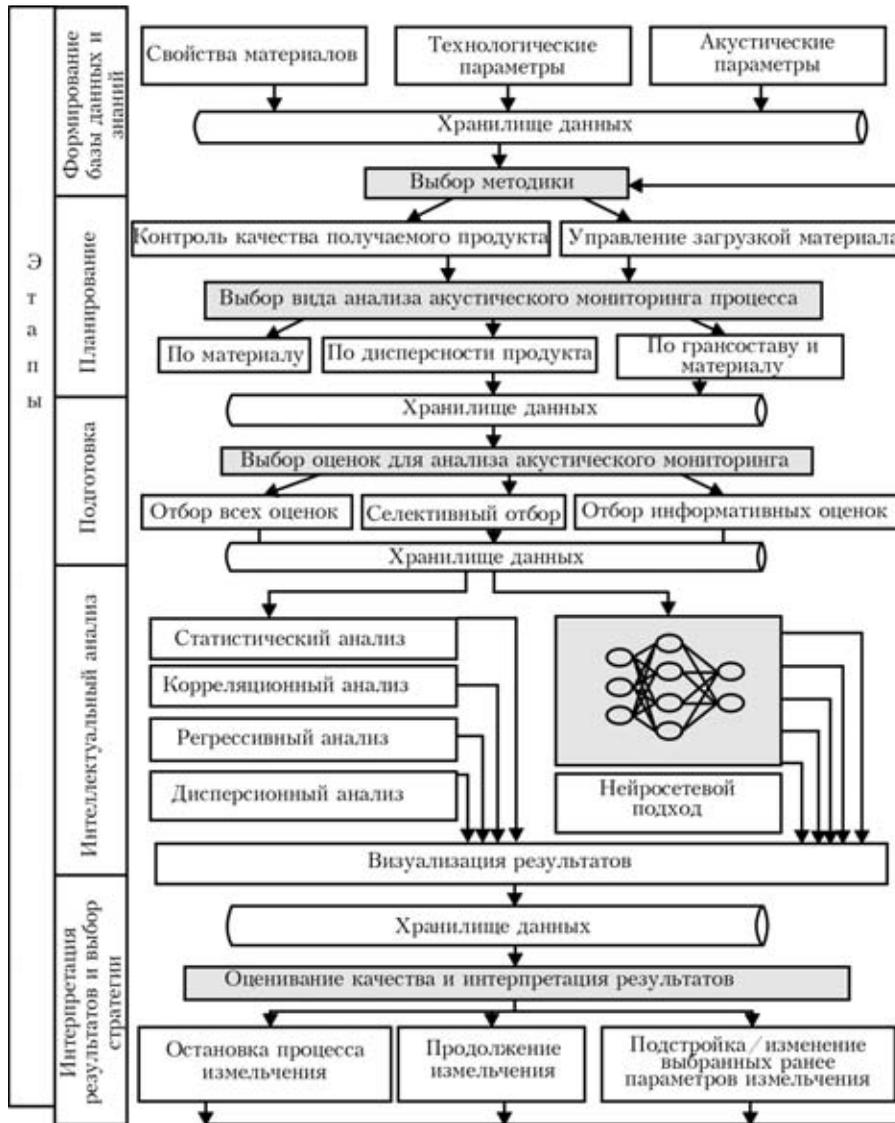


Рис. 8. Информационная технология струйного измельчения

установить связь технологических и акустических параметров процесса, прогнозировать процесс измельчения и управлять его режимами.

Разрабатываемая информационная технология сочетает в себе большой объем экспериментальных данных измельчения различных материалов, преимущества АЭ диагностики процесса, позитивные качества интеллектуального анализа результатов исследования на основе нейросетевого моделирования, а также позволяет совершенствовать методику АЭ мониторинга и принимать решения по повышению эффективности и качества струйного измельчения.

1. Горобец Л. Ж. Развитие научных основ измельчения твердых полезных ископаемых: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук / НГУД. — 2004. — 35 с.
2. Трипалин А. С., Буйнов С. И. Акустическая эмиссия. Физико-механические аспекты / Изд-во Ростовского ун-та, 1986. — 160 с.
3. Булат А. Ф., Хохолов В. К. Геофизический контроль массива при отработке угольных пластов. — Киев: Наук. думка, 1990. — 168 с.

4. Пиллов П. И., Горобец Л. Ж. Дискретность разрушения при измельчении руд // ГИАБ. — 2006. — № 11. — С. 357–363.
5. Кинетика и иерархия процесса накопления трещин в гетерогенных материалах. Геодинамика и напряженное состояние недр Земли / Под ред. А. В. Леонтьева. — Новосибирск: Ин-т горного дела, 2004. — С. 373–377.
6. Гейликман М. Б., Писаренко В. Ф. О самоподобии в геофизических явлениях. Дискретные свойства геофизической среды / Под ред. М. А. Садовского. — М.: Наука, 1989. — С. 109–131.
7. Об износе разгонных трубок при газоструйном измельчении / Н. Д. Коваленко, Г. А. Стрельников, В. А. Грушко и др. // Техн. механика. — 2009. — № 4. — С. 94–110.
8. Бовенко В. Н., Горобец Л. Ж., Прядко Н. С. О физических критериях разрушения и диспергирования // Вісн. нац. техн. ун-та «ХПІ». — Харьков, 2007. — Вип. № 26. — С. 148–153.
9. Бовенко В. Н., Старцев В. М. Полимерные стекла: новые методологический и методический подходы к описанию и прогнозированию прочностных свойств // Физика и химия стекла. — 1999. — 25, № 1. — С. 107–115.
10. Прядко Н. С. Стохастическая модель газодинамического измельчения // Техн. механика. — 2008. — № 1. — С. 121–131.
11. О прогнозировании разрушения горных пород / С. Н. Журков, В. С. Куксенко, В. А. Петров и др. // Изв. АН СССР. Физика Земли. — 1977. — № 6. — С. 11–18.



12. *Исследование* связи акустических и технологических параметров процесса струйного измельчения / Л. Ж. Горобец, Н. С. Прядко, И. А. Шуляк, И. В. Верхоробина // Вест. НТУ «ХПИ». — 2006. — № 30. — С. 16–21.
13. *Интенсификация* процесса струйного измельчения на основе анализа акустических параметров // Акустическое исследование измельчаемости гетерогенных материалов струйным способом // ЗКК. — 2008. — № 34(75). — С. 67–74.
14. *Акустические* и технологические характеристики процесса измельчения в струйной мельнице // П. И. Пилов, Л. Ж. Горобец, В. Н. Бовенко, Н. С. Прядко // Изв. вузов. Горный журнал. — 2009. — № 4. — С. 15–121.
15. *Интенсификация* процесса струйного измельчения на основе анализа акустических параметров / Л. Ж. Горобец, Н. С. Прядко, И. А. Шуляк, Н. И. Соболевская // Вибрации в технике и технологиях. — 2009. — № 2(54). — С. 15–19.
16. *О критериях* акустического мониторинга струйного измельчения / Л. Ж. Горобец, Н. С. Прядко, И. А. Шуляк, Б. Ф. Бевзенко // Техн. механика. — 2009. — № 3. — С. 116–121.
17. *Информационная* технология получения тонкодисперсных материалов струйным измельчением / Н. С. Прядко, Т. М. Буланая, Л. Ж. Горобец и др. // Системные технологии: региональный межвузовский сб. науч. тр. — 2010. — Вып. 3(58). — С. 40–46.
18. *Опыт* ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины в области акустико-эмиссионного контроля / Б. Е. Патон, Л. М. Лобанов, А. Я. Недосека и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль — 2012. — № 1. — С. 7–22.
19. *Єременко В. С., Переїденко А. В., Монченко О. В.* Застосування нейромережевих технологій у системах неруйнівного контролю // Те саме. — 2012. — № 1. — С. 35–41.

Поступила в редакцию
03.04.2012

IC-MINDT-2013 Materials Integrated Non Destructive Testing - 2013

5th INTERNATIONAL CONFERENCE ON NDT OF HSNT
20–22 May, 2013
ATHENS – Greece
IC-MINDT-2013

NEW ABSTRACT SUBMISSION DEADLINES!!!

The 5th International Conference on NDT of HSNT (IC-MINDT-2013) will be held from May 20-22, 2013 in Athens, Greece. The conference will continue the excellent tradition of gathering world-class researchers, engineers and educators engaged in the fields of Non Destructive Testing to meet and present their latest activities. You are cordially invited to attend this interesting event.

In the last few weeks further progress was achieved in the organization of IC-MINDT-2013. Considering the increasing interest in the meeting and the requests to extend the deadline, we set the new deadline for abstract submission for October 20, 2012. You can find details about submission and generally about the conference on our website at www.hsnt.gr/IC-MINDT-2013/. If you need additional information, do not hesitate to contact us. We hope to see you in Athens.

СВАРКА КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА

4–6 декабря 2012

4 декабря — **Научно-техническая конференция «Сварка и Диагностика»**

Екатеринбург, МВЦ «Екатеринбург-ЭКСПО»



ПОШИРЕННЯ ПОВЕРХНЕВОЇ ТРІЩИНИ В СТІНЦІ ТРУБИ НАФТОПРОВОДУ З УРАХУВАННЯМ ЇЇ НАВОДНЮВАННЯ

Д. В. РУДАВСЬКИЙ, канд. техн. наук (Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів)

Запропоновано метод оцінки залишкової довговічності елемента труби нафтопроводу із тріщиноподібним дефектом на його внутрішній поверхні. Досліджено кінетику поширення тріщини із урахуванням впливу наявності концентрації водню в стінці нафтопроводу. Початкові розміри дефекту визначено методом акустичної емісії. Показано, що коливання внутрішнього тиску в нафтопроводі та його наводнення залежно від початкових розмірів дефекту можуть спровокувати утомне поширення дефекту.

A method is proposed for evaluation of residual fatigue life of an oil pipe element with a cracklike defect on its inner surface. Kinetics of crack propagation was studied, allowing for the influence of the presence of hydrogen concentration in the oil pipeline wall. Initial dimensions of the defect were determined by acoustic emission method. It is shown that inner pressure variations in the oil pipeline and its hydrogenation, can provoke fatigue-induced defect propagation, depending on the initial dimensions of the defect.

Для встановлення термінів безпечної експлуатації трубопроводів та їх елементів проводять технічну діагностику небезпечних ділянок. Найпоширенішими та найрозвинутішими серед сучасних методів НК для виявлення експлуатаційних дефектів типу тріщин є акустичні методи [1,2].

Метою досліджень є створення методики оцінки залишкового ресурсу елемента нафтопроводу з наявною у ньому тріщиною за даними акустико-емісійного (АЕ) діагностування.

Розглянемо задачу про ріст поверхневої півеліптичної утомної тріщини, що розташована на внутрішній стінці нафтопроводу помпувальної станції, виготовленого зі сталі 16ГС за циклічної зміни внутрішнього тиску $p = 3,7$ МПа із асиметрією циклу $R = 0,85$ (рис. 1). Механічні характеристики сталі: межа плинності $\sigma_0 = 450$ МПа, нижнє порогове значення циклічної тріщностійкості $K_{th} = 3,5$ МПа·м^{1/2}, циклічна тріщностійкість $K_{Ic} = 120$ МПа·м^{1/2}.

Задача полягає у визначенні кінетики росту утомної тріщини. Нехай a_0, b_0 — початкові розміри тріщини, r — внутрішній радіус труби, h — товщина стінки ($h = 0,01$ м).

Для визначення кінетики контуру тріщини (рис. 1, б) вважали, що контур тріщини під час її поширення завжди залишається плоским та близьким до півеліптичного. Тоді залежність довжини півосей цього контуру від кількості циклів навантаження можна отримати із розв'язку системи двох звичайних диференціальних рівнянь у двох точках контуру, що відповідають великій та малій півосі ($\varphi = 0, \varphi = \pi/2$) (рис. 1, б):

$$V \frac{da}{dN} = V [K_{I_{max}}(a, b, \varphi = 0), C_H],$$

$$\frac{db}{dN} = V [K_{I_{max}}(a, b, \varphi = \pi/2), C_H], \quad (1)$$

де $K_{I_{max}}$ — максимальне значення коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) у відповідних точках контуру тріщини; C_H — концентрація водню в стінці труби біля контуру тріщини.

Граничні умови:

$$N = 0: a = a_0, b = b_0,$$

$$N = N_d: b = h, \quad (2)$$

де N — кількість циклів зміни тиску в трубi; N_d — залишкова довговічність стінки труби.

Швидкості росту V півосей контуру тріщини визначали на основі рівняння, отриманого у праці [3]

$$V(a, b) = \frac{0,03 \sigma_0^{-2} (1 - R)^2 (1 - R^4) K_{I_{max}}^4(a, b)}{\alpha (K_{Ic}^2 - A_1 E \sigma_0 C_H) - K_{I_{max}}^2(a, b)}, \quad (3)$$

де E — модуль пружності; α, A_1 — деякі постійні матеріалу.

Для тріщини в нашому випадку КІН в кожній точці її контуру можна представити у вигляді [4]:

$$K_I(a, b, \varphi) = \sigma \sqrt{\pi b} F(\xi, \chi, \varphi) \quad (4)$$

де

$$\xi = \frac{b}{h}; \chi = \frac{b}{a}; \sigma = p \left(\frac{r}{h} - \frac{H_1}{2} \right); F = \frac{H_2 + H_3 \xi^3 + H_4 \xi^4}{q} f_1 f_2;$$

$$H_1 = H_5 + (H_6 - H_5) \sin^q \varphi; q = 0,2 + \chi + 0,6 \xi;$$

$$H_5 = 1 - 0,34 \xi - 0,11 \chi \xi;$$

$$H_6 = 1 - (1,22 + 0,12 \chi) \xi + (0,55 - 1,05 \chi^{0,75} + 0,47 \chi^{1,5}) \xi^2;$$

$$Q = \sqrt{1 + 1,464 \chi^{1,65}}; H_2 = 1,13 - 0,09 \chi; H_3 = -0,54 + \frac{0,89}{0,2 + \chi};$$

$$H_4 = 0,5 - \frac{0,1}{0,65 + \chi} + 14(1 - \chi)^{2,4}; f_1 = (\chi^2 \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi)^{1/4};$$

$$f_2 = 1 + (0,1 + 0,35 \chi^2)(1 - \sin \varphi)^2.$$

Система звичайних нелінійних диференціальних рівнянь першого порядку (1) з урахуванням (2)–(4) була розв'язана числовим методом Рунге–

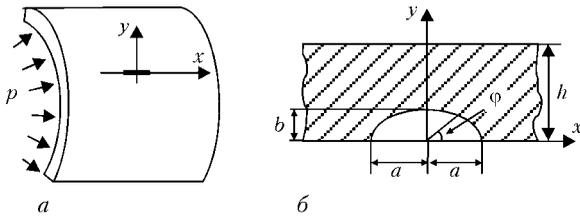


Рис. 1. Схема елемента труби нафтопроводу (а) та розташування півеліптичної тріщини (б)

Кутта. Рівень концентрації водню C_H у стінці труби біля тріщиноподібного дефекту оцінювали із розв'язку дифузійної задачі.

Розрахунок концентрації водню біля вершини тріщини. Розглянемо пружно-пластичне ізотропне тіло, яке початково рівномірно наводнене до деякого рівня концентрації водню C_0 і містить плоску тріщину розміром l в умовах симетричного відносно площини тріщини напруженого стану (рис. 2). Нехай зовні у тріщину попадає водневомісне середовище, забезпечуючи таким чином у поверхневому шарі біля її вершини деяку концентрацію водню C_s .

Концентрацію водню в околі вершини тріщини шукали на основі узагальненого закону Фіка:

$$\frac{\partial C_H}{\partial t} = D_H \nabla^2 C_H - \frac{D_H V_H}{RT} \nabla \sigma_T \nabla C_H, \quad (5)$$

де D_H — коефіцієнт дифузії водню у металі; V_H — парціальний молярний об'єм; t — час; R — універсальна газова постійна.

Апроксимуючи розподіл гідростатичного напруження σ_T на продовженні тріщини біля її вершини кусково-лінійною залежністю (рис. 3), в одновимірному випадку рівняння дифузії (5) зведеться до системи двох диференціальних рівнянь:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_1(\xi, \tau)}{\partial \tau} &= \frac{\partial^2 C_1(\xi, \tau)}{\partial \xi^2} - 2m \frac{\partial C_1(\xi, \tau)}{\partial \xi}, \quad 0 < \xi < 1, \\ \frac{\partial C_2(\xi, \tau)}{\partial \tau} &= \frac{\partial^2 C_2(\xi, \tau)}{\partial \xi^2}, \quad \xi > 1, \end{aligned} \quad (6)$$

де $\xi = x/x_m$; $\tau = Dt/x_m^2$; $m = (\sigma_T)'_x V_H x_m / 2RT$.

Взявши до уваги, що в точці $x = 1$ повинні виконуватися умови неперервності потоку [5] і концентрації водню

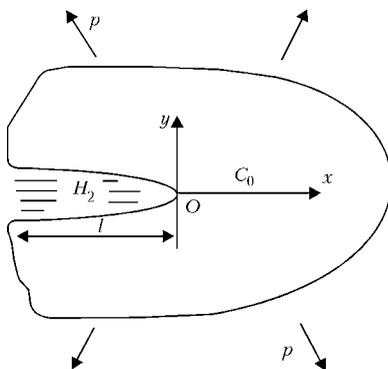


Рис. 2. Схема навантаженої пластини із тріщиною

$$\frac{\partial C_1(\xi, \tau)}{\partial \xi} - 2m C_1(\xi, \tau) = \frac{\partial C_2(\xi, \tau)}{\partial \xi}, \quad \xi = 1$$

$$C_1(\xi, \tau) = C_2(\xi, \tau), \quad \xi = 1 \quad (7)$$

та вважаючи, що фізико-хімічні умови наводнення металу в вершині тріщини забезпечують постійність величини концентрації водню C_s в її поверхневому шарі, тобто представляючи граничну умову рівняння дифузії у вигляді

$$C_1(0, \tau) = C_s, \quad (8)$$

визначали розподіл концентрації водню в околі вершини тріщини з розв'язку задачі дифузії (6)–(8) за початкової умови:

$$C_1(\xi, 0) = C_2(\xi, 0) = C_0. \quad (9)$$

Задача (6)–(9) з умовою обмеженості концентрації водню на безмежності:

$$C_2(0, \tau) < \infty \quad (10)$$

є граничною задачею для диференціального рівняння в частинних похідних 2-го порядку параболічного типу з кусково-неперервними коефіцієнтами. За допомогою комбінації методів інтегрального перетворення Лапласа та граничної інтерполяції було отримано розв'язок цієї задачі у вигляді:

$$C(\xi, \tau) = \frac{(2C_s \xi^{-1} \sqrt{\tau \pi^{-1}} e^{[m\xi - \xi^2/4\tau]} + C_0) C_s e^{2m\xi}}{2C_s \xi^{-1} \sqrt{\tau \pi^{-1}} e^{[m\xi - \xi^2/4\tau]} + C_s e^{2m\xi}}. \quad (11)$$

На рис. 4 показано розподіл концентрації водню (11) біля вершини тріщини.

Приймали рівень початкової концентрації водню в матеріалі $C_0 = 0,5C_s$. На основі отриманого розв'язку можна зробити висновок, що наявність попереднього наводнення та поля механічних напружень біля вершини тріщини може збільшувати концентрацію водню в цій зоні у 10...12 разів відносно поверхневої.

Результати розрахунку залишкової довговічності елемента нафтопроводу. Для виявлення зародження чи розвитку тріщиноподібних дефектів у стінці трубопроводів використовували лінійну локацію джерел АЕ. При цьому коефіцієнт п'єзочутливості первинного перетворювача АЕ (ПАЕ) становив $\eta = 1,6 \cdot 10^9$ В/м. Внаслідок АЕ-

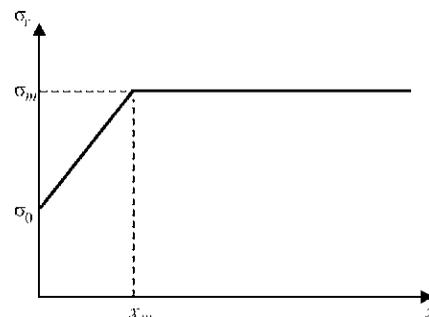


Рис. 3. Апроксимація розподілу гідростатичного напруження біля вершини тріщини

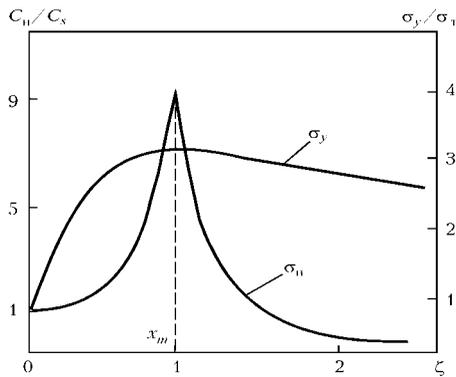


Рис. 4. Графічне представлення розподілу концентрації водню C_H в полі механічних напружень σ_y біля вершини тріщини

контролю було зареєстровано три події з амплітудами на виході ПАЕ 3; 3,8; 5 мВ. Відстань від джерела АЕ до ПАЕ була 2,8 м.

Згідно концепції визначення об'ємної пошкодженості матеріалу [6] еквівалентну площу новоутворених поверхонь тріщин, що генерували АЕ, визначали через радіус r_0 еквівалентного круга з урахуванням зникання амплітуди пружної хвилі АЕ:

$$u_{\max} \Big|_{c_1} = \delta_i \frac{\sigma_0 \Phi_i^{(d)}(\theta) r_0^2}{T_r \rho c_1^2 R}, \quad (12)$$

де $u_{\max} \Big|_{c_1}$ — максимальне значення модуля вектора переміщень; $\Phi_i^{(d)}(\theta)$ — функція кутової залежності амплітудних значень модуля вектора переміщень; T_r — час релаксації; ρ — густина матеріалу; c_1 — швидкість пружної хвилі; R — відстань від джерела хвилі до точки спостереження.

Отримали, що сумарна еквівалентна площа визначалась площею круга радіусом $r_0 \approx 10^{-4}$ м.

На рис. 5 показано результати прикладів розрахунку довговічності N_d стінки труби нафтопроводу для різних величин площі S півдискової тріщини на основі розв'язку рівнянь системи (1).

Висновок

Розрахунок показав, що тріщини із початковим радіусом поверхні $r_0 < 3 \cdot 10^{-3}$ м не розвиваються, оскільки за даних умов експлуатації нафтопроводу величина КІН для таких тріщин менша його порогового значення K_{th} . Отже, виявлені тріщиноподібні дефекти розміром $r_0 \approx 10^{-4}$ м під час АЕ-діагностування ділянки нафтопроводу помпувальної станції є безпечними з точки зору утомного розтріскування за даних умов експлуатації.

Слід зауважити, що згідно закону Сівертса [5] та розв'язку задачі дифузії водню (6) збільшення внутрішнього тиску в трубопроводі призведе до підвищення рівня концентрації вод-

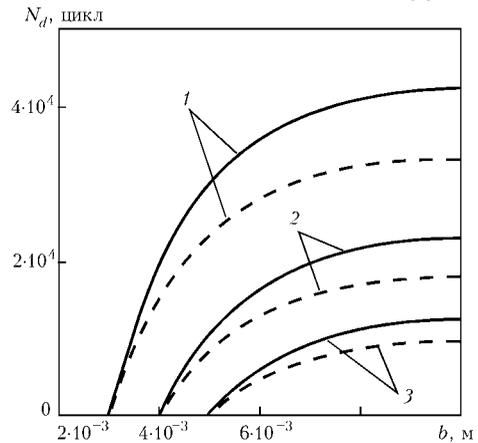


Рис. 5. Залежність залишкової довговічності N_d елемента нафтопроводу за різних початкових розмірів півдискової тріщини: 1 — $r_0 = 3 \cdot 10^{-3}$; 2 — $4 \cdot 10^{-3}$; 3 — $5 \cdot 10^{-3}$ м (суцільні лінії — без врахування наводнення стінки труби, штрихові — із врахуванням)

ню на його поверхні, а відповідно і в околі біля вершини тріщини. Цей факт, згідно проведених розрахунків (рис. 5), може стати причиною значного зниження залишкової довговічності елемента труби нафтопроводу.

Цель работы — построение методики оценки остаточного ресурса элемента нефтепровода с трещиной по данным акустико-эмиссионного диагностирования. Рассматривали поверхностную полуэллиптическую трещину, расположенную на внутренней поверхности трубы. Исследована кинетика распространения трещины с учетом влияния концентрации водорода в стенке нефтепровода. Уровень насыщения стенки трубы нефтепровода водородом определяли из решения задачи диффузии водорода в поле механических напряжений возле вершины трещины. Показано, что колебания внутреннего давления в нефтепроводе и ее наводороженность в зависимости от начальных размеров дефекта могут спровоцировать его усталостный рост.

1. Назарчук З. Т., Скальський В. Р. Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій. Наук.-техн. посібник. У 3 т. — Київ: Наук. думка, 2009. — 887 с.
2. Скальський В. Р., Сулим Г. Т. Основи акустичних методів неруйнівного контролю. — Львів: Вид. центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2010. — 386 с.
3. Андрейків О. Є., Рудавський Д. В., Гембара О. В. Розрахункова модель поширення втомних тріщин у наводнених зварних з'єднаннях // Фіз.-хім. механіка матеріалів. — 2002. — № 6. — С. 18–24.
4. Newman J. C., Raju I. S. An empirical stress intensity factor equation for the surface crack // Int. J. Fract. Mech. — 1981. — 15, № 1/2. — P. 185–192.
5. Колачев Б. А. Водородная хрупкость металлов. — М.: Металлургия, 1985. — 217 с.
6. Скальський В. Р., Андрейків О. Є. Оцінка об'ємної пошкодженості матеріалів методом акустичної емісії. — Львів: Вид. центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2006. — 330 с.

Надійшла до редакції
05.04.2012



ОЦЕНКА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СОСУДОВ С ВМЯТИНАМИ

В. М. ДОЛИНСКИЙ, канд. техн. наук, **В. Н. СТОГНИЙ**, **В. И. ЧЕРЕМСКАЯ**, инженеры
(ПАО «УКРНИИХИММАШ», г. Харьков)

Приведены данные расчетов и экспериментов несущей способности сосудов с вмятинами, выполненные сотрудниками УкрНИИХиммаш. Даны результаты расчетов ряда промышленных объектов, эксплуатирующихся на химических и нефтеперерабатывающих производствах. Выполнено сопоставление различных нормативных методик и даны рекомендации по их применению.

The paper gives the data of design and experiments on load-carrying capacity of vessels with dents, made by UkrNIChimmash. Results of design of a number of industrial facilities operated in chemical and petroleum-processing productions are given. Comparison of various normative procedures was made, and recommendations on their application are given.

Вмятина представляет собой распространенный дефект конструкции. Рассмотрим протяженную вдоль оси сосуда вмятину, осевое сечение которой представлено на рис. 1.

Оценку работоспособности сосудов с вмятинами под действием внутреннего давления можно выполнить по различным нормативным документам [1–3]:

1. РД [1]:

$$\Delta \leq (G/2,21) [1,22/G^2 - 1]; \quad (1)$$

2. ГОСТ Р [2]:

$$\Delta \leq 0,5(1/G - 1/3) [1 + 10,9\gamma^2\eta G/(n_T^2 - 1)] \quad (2)$$

при $n = \pi/(2\alpha)$;

3. СОУ [3]:

$$\Phi(\gamma, G, \Delta) \leq [\varepsilon], \quad (3)$$

где $\Phi(\gamma, G, \Delta) = (1/2\gamma)\{1 - [\cos \alpha - (1 + A_1)^{1/2}]/[1 - \cos \alpha(1 + A_1)^{1/2} + 0,5A_1]\}$;

$A_1 = \{(G/[n_T])^2(\cos^2 \alpha + 1) - 2\}/\{(G/[n_T])(2\gamma - G/[n_T])\}$;

$\alpha = 2\arcsin(\Delta/4\gamma)^{1/2}$; $\Delta = h/S$; $G = \sigma_H/[\sigma]$; $\gamma = D/2S$;

$\eta = [\sigma]/E$.

Здесь D , S , h — диаметр, толщина стенки и глубина вмятины соответственно; σ_H , $[\sigma]$ — номинальные напряжения в сечении, не ослаблен-

ном вмятиной соответственно, и допускаемые [4] напряжения; E — модуль Юнга; $[\varepsilon]$ — допускаемые деформации [5]; G — степень нагруженности конструкции; γ — относительный радиус; $[n_T]$ — нормативный коэффициент запаса прочности по пределу текучести; $[n_T] = 1,5$ [4].

Результаты расчетов по РД [1] и по ГОСТ Р [2] представлены на рис. 2, по СОУ [3] — на рис. 3.

При этом использовались механические характеристики сосудов из углеродистой и низколегированной сталей при температурах от 0 до 300 °С в пределах изменения параметров: $10 \leq \gamma \leq 500$; $0 < \alpha \leq 30^\circ$; $0,2 \leq G \leq 1$.

Во всех случаях допускаемые значения глубины вмятины возрастают с уменьшением нагруженности G и с ростом относительного радиуса γ . При этом оказывается, что РД [1] и ГОСТ Р [2] содержат завышенные запасы прочности по сравнению с СОУ [3], несмотря на то, что в СОУ принят невысокий уровень допускаемых деформаций — 1 %.

Расчет ряда объектов, работающих в промышленности (рис. 4 и таблица), показывает, что из

Сосуды с вмятинами

Номер сосуда	Название сосуда или аппарата, предприятие	γ	Δ	G
1	Цистерна ПС-100 зав. № 521271, ПАО «Лукойл-Одесский нефтеперерабатывающий завод»	83,8	1,39	0,798
2	Колонна К-5/6 зав. № 4525, ПАО «УКРТАТНАФТА», г. Кременчуг	151	1,51	0,352
3	Колонна К-8 зав. № 7232, ПАО «УКРТАТНАФТА», г. Кременчуг	90,9	0,814	0,280
4	Теплообменник Т-1/1 зав. № 12354, ПАО «УКРТАТНАФТА», г. Кременчуг	75,9	0,711	0,577
5	Колонна К-5 зав. № 62104, ПАО «УКРТАТНАФТА», г. Кременчуг	154	1,80	0,974
6	Колонна К-3 зав. № 222851, ПАО «УКРТАТНАФТА», г. Кременчуг	83,4	1,93	0,184
7	Резервуар для хранения серной кислоты $V = 330 \text{ м}^3$, ОАО «Черкасское химволокно»	522	11,6	0,282
8	Колонна К-2 зав. № 5876, ПАО «УКРТАТНАФТА», г. Кременчуг	172	3,46	0,250
9	Колонна К-4 зав. № 62103, ПАО «УКРТАТНАФТА», г. Кременчуг	163	0,374	0,807
10	Колонна К-4 зав. № 62103, ПАО «УКРТАТНАФТА», г. Кременчуг	186	0,641	0,905

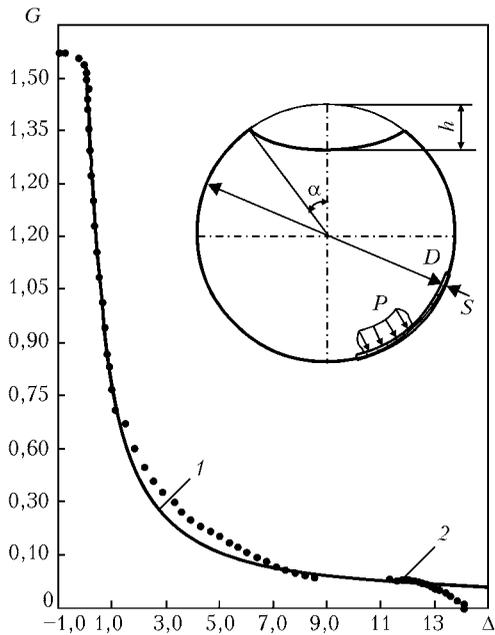


Рис. 1. Вмятина, протяженная вдоль оси сосуда: 1 — теоретическая кривая; 2 — экспериментальные точки

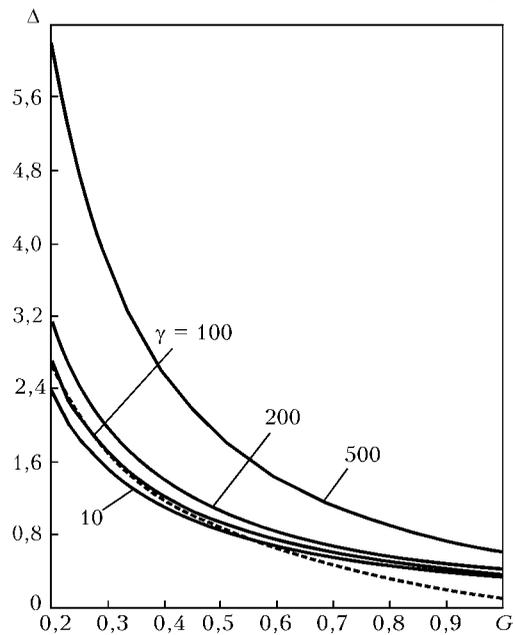


Рис. 2. Результаты расчетов по ГОСТ [2] и РД [1]: расчет по ГОСТ Р — сплошные линии; расчет по РД — пунктирные

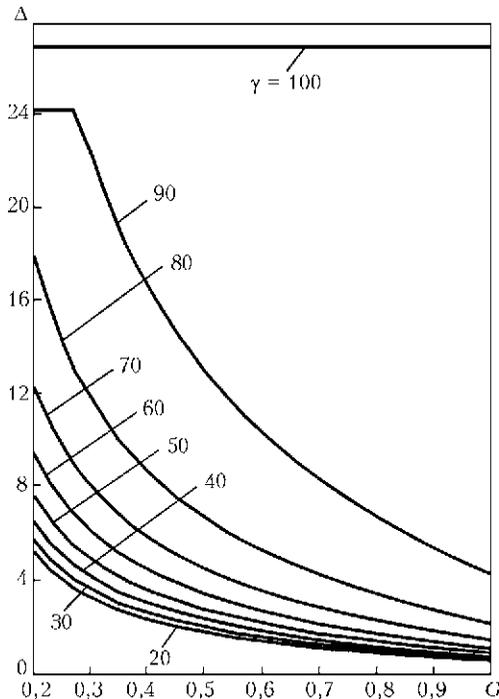


Рис. 3. Результаты расчетов по СОУ [3]

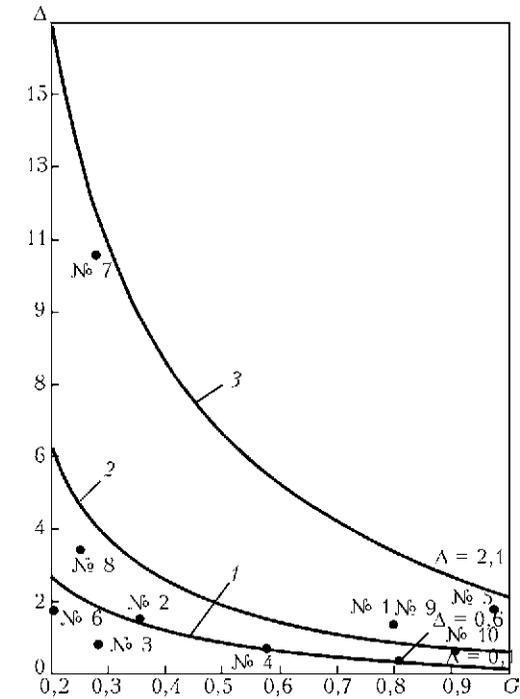


Рис. 4. Оценка работоспособности сосудов с вмятинами: 1 — по РД [1]; 2 — по ГОСТ Р ($\gamma = 500$) [2]; 3 — по СОУ ($\gamma = 80$) [3]; № 1–10 — данные сосудов (таблица)

десяти рассмотренных случаев все удовлетворяют условию прочности по СОУ; семь удовлетворяют условию прочности по ГОСТ Р и только три удовлетворяют условию прочности по РД.

Имеющиеся расхождения могут быть пояснены с учетом теоретических и экспериментальных исследований, выполненных в УкрНИИхиммаше на моделях сосудов с вмятинами. На рис. 1 показаны результаты расчетов и экспериментов, проведенных на одном из сосудов. Каждая точка на полученной кривой соответствует образованию шарниров текучести в центре и на краю вмятины. В РД [1] такое состояние считается предельным, что дает необоснованно

большие запасы прочности. Повышение давления приводит к рихтовке, при которой шарниры текучести возникают при большем значении давления.

Выводы

Таким образом, более правильным является оценка прочности по допускаемой деформации. Принятая в ГОСТ Р оценка по деформациям ($[\epsilon] = 0,2...0,3\%$) согласно мнению авторов является заниженной, что подтверждается нормативным документом [5], а также опытом эксплуатации со-



судов и аппаратов в химической и нефтехимической промышленности.

1. РД 26-6-87. Сосуды и аппараты стальные. Методы расчета на прочность с учетом смещения кромок сварных соединений, угловатости и некруглости обечаек.
2. ГОСТ Р 52887.11-2007. Нормы и методы расчета на прочность. Метод расчета на прочность обечаек и днищ с учетом смещения кромок сварных соединений, угловатости и некруглости обечаек.
3. СОУ ОАО «УкрНИИХиммаш» — 011:2010. Сосуды. Аппараты. Трубопроводы. Нормы и методы расчета на прочность. Оценка работоспособности объектов с вмятинами, выпучинами, овальностью и смещением кромок сварных соединений.
4. ГОСТ 14249-89. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность.
5. ДСТУ 40032000. Сосуды и аппараты. Выбор параметров упрочняющей обработки.

Поступила в редакцию
02.11.2011

II ВСЕУКРАИНСКАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ «СВАРКА И РОДСТВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ТЕХНОЛОГИИ»

4-8 сентября 2012 г. в курортном поселке Коблево на базе отдыха Национального университета кораблестроения «Корабел» прошла II Всеукраинская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Сварка и родственные процессы и технологии». Организаторами конференции выступили Национальный университет кораблестроения им. Адмирала Макарова и Академия наук судостроения Украины по инициативе Совета молодых ученых и Студенческого парламента университета. Конференция проходила три дня в режиме пленарных заседаний. Были представлены доклады от научных и учебных организаций Киева, Николаева, Херсона, Львова, Харькова, Краматорска, Мариуполя и Луганска по следующим направлениям:

- прогрессивные технологии сварки и родственные технологии;
- новые конструкционные и функциональные материалы, покрытия;
- математическое моделирование и информационные технологии;
- работоспособность, техническая диагностика и неразрушающий контроль.

Значительное количество докладов по различным направлениям сделано молодыми учеными и специалистами — сотрудниками ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. Выступления посвящены как обеспечению технологических условий сварки, наплавки, обработки деталей и конструкций, так и исследованию фундаментальных процессов, происходящих при этих условиях.

Интерес у аудитории вызвали доклады Е. Половецкого «Влияние принудительной схемы деформирования на структуру и свойства сварного соединения при диффузионной сварке АМг6 с ВТ6»; А.Полишко «Неметаллические включения в зоне сплавления однородных слоев модельного слитка из высоколегированной стали типа 316, полученного методами ЭШН ЖМ»; К. Ляпиной «Методы получения суспензий с использованием инкапсулированных нанопорошков металлов»; Ю. Хохловой «Исследование возможности применения активатора на основе галлия для соединения пеноалюминия с легкими сплавами»; И. Березина «Effect of ultrasonic impact treatment on fatigue performance welded joints of high strength aluminium alloy»; Д. Ермоленко «Влияние нанообразований в металле на формирование микроструктуры сварного шва и его механические свойства»; И. Лендела «Механические колебания с управляемыми параметрами в дуговой механизированной и автоматической сварке»; Р.Селина «Сварка в узкий зазор соединений толщиной 40 мм стали 20» и др. Хотелось отметить интересное выступление молодого специалиста, впервые принимавшего участие в конференциях, Т. Зубер, которая представила результаты исследований «Влияния скоростного охлаждения на структуру и твердость стали 06ГБД с карбонитридным упрочнением после испытаний на установке Gleeble 3800».

Участники конференции имели возможность в ходе обсуждения задать вопросы, обменяться мнениями о прослушанных докладах и обсудить перспективы сотрудничества. Лучшие доклады конференции будут опубликованы в сборнике научных работ Национального университета кораблестроения им. Адмирала Макарова.

Участники конференции выражают свою благодарность руководству университета и членам совета молодых ученых за проведение мероприятия на высоком организационном и техническом уровне.

С. Г. Григоренко, канд. техн. наук





НОВЫЕ КНИГИ

Б.Е. Патон, Л.М. Лобанов, А.Я. Недосека, С.А. Недосека, М.А. Яременко

Акустическая эмиссия и ресурс конструкций: Теория, методы, технологии, средства, применение. — Киев: ИНДПРОМ, 2012. — 312 с.



Альбом наглядно описывает акустические явления в материалах, связанных с дискретным характером их разрушения при приложении нагрузки различных видов. Дискретный характер разрушения приводит к появлению импульсов упругих волн (квантов излучения), распространяющихся в материале от места разрушения и строго соответствующих характеру и виду разрушения или изменению его структуры. Это явление получило название акустической эмиссии (АЭ). Показаны основные факторы, снижающие предельные усилия, при которых появляется АЭ. В альбоме также показано практическое применение АЭ при оценке состояния материалов конструкций, приведены разработанные на основе АЭ технологии контроля, необходимое оборудование и приборы. Показано, что в

процессе непрерывного мониторинга контроль конструкций с оценкой их остаточного ресурса может осуществляться как на месте, так и дистанционно.

Альбом предназначен для специалистов, занимающихся технической диагностикой конструкций или проходящих переподготовку на курсах повышения квалификации, преподавателей соответствующих специальностей при чтении лекций и проведении практических занятий, а также студентов и аспирантов, изучающих явление акустической эмиссии и применяющих эти знания при практическом контроле работоспособности конструкций. Альбом представляет интерес для широкого круга инженеров и научных работников технических специальностей.



Акустична емісія при діагностуванні стану сховищ аміаку ВАТ «Одеський припортовий завод»

/ Під ред. проф. А.Я. Недосеки. — Киев: ИНДПРОМ, 2012.— 96 с. (укр. яз.)

Альбом може бути корисним для широкого загалу інженерів та наукових співробітників технічних спеціальностей, а також студентів, аспірантів які вивчають явища акустичної емісії.



A. Nedoseka. Fundamentals of evaluation and diagnostics of welded structures / Cambridge International Science Publishing Limited, 2012.— 642 с.

Книга представляет собой авторизованный перевод на английский язык монографии: Недосека А.Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций. — Киев: Издательство «ИНДПРОМ», 2008. — 816 с. В ней изложены основные проблемы, связанные с обеспечением безопасности эксплуатации конструкций и сооружений, возникающие при расчете их прочности, при испытаниях и в процессе эксплуатации. Большое внимание уделено теории, методам и средствам диагностики и оценки состояния материала конструкций, его остаточному ресурсу. Изложены основные вопросы теории прогнозирования и принятия решений при оценке состояния конструкций. Освещены современные методы расчета и измерения температурных полей, напряжений и деформаций, показаны способы борьбы с вредными последствиями сварочных напряжений и деформаций, рассмотрены основы

классической и квантовой механики разрушения.

Предназначена для студентов, аспирантов и преподавателей машиностроительных специальностей вузов, а также для инженеров предприятий и организаций, занимающихся контролем и диагностикой конструкций



МЕТАЛЛУРГИЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ И СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ.

— Киев: Академперіодика, 2012. — 526 с. Твердый переплет, 200×290 мм.

Сборник включает 120 статей сотрудников отдела исследований физико-химических процессов в сварочной дуге Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, опубликованных ранее преимущественно в журнале «Автоматическая сварка», которые обобщают полувековой опыт научно-исследовательской деятельности отдела. Представленные статьи охватывают широкий круг вопросов металлургии дуговой сварки плавлением и разработки сварочных материалов.

Сборник предназначен для широкого круга специалистов, занимающихся изучением металлургии дуговой сварки, разработкой сварочных материалов и технологий их производства.



О.В. БЛОЦЬКИЙ. ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНА РЕНТГЕНОГРАФІЯ ФАЗОВИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ У МЕТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛАХ.

— Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2012. — 224 с. Твердый переплет, 165×235 мм (укр. яз.).

В монографии на основе системных исследований изложены впервые разработанные методические основы и результаты исследования особенностей кинетики фазовых превращений в лучах высокотемпературной рентгенографии металлических материалов. Кинематографические съемки осуществлены на оригинальных конструкциях рентгеновского оборудования.

Для научно-технических работников, разрабатывающих новые материалы и изучающих их строение и свойства, а также преподавателей, аспирантов и студентов вузов соответствующих специальностей.

Заказы на книги просьба направлять в редакцию журнала ТДНК.
Тел./факс: (38044) 200-82-77, 200-54-84; E-mail: journal@paton.kiev.ua

ПОДПИСКА — 2013

на журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»

Украина		Россия		Страны дальнего зарубежья	
на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
160 грн.	320 грн.	900 руб.	1800 руб.	30 дол. США	60 дол. США

В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.

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



Подписка на электронную версию журнала
«Техническая диагностика и неразрушающий контроль»
на сайте: <http://www.rucont.ru>.

По подписке доступны выпуски журнала, начиная с 2009 г. в формате *.pdf. Подписка возможна на отдельные выпуски и на весь архив, включающий все выпуски за 2009–2011 гг. Подписка доступна физическим и юридическим лицам.

РЕКЛАМА в журнале «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»

Реклама публикуется на обложках и внутренних вклейках следующих размеров

- Первая страница обложки (190×190 мм)
- Вторая, третья и четвертая страницы обложки (200×290 мм)
- Первая, вторая, третья, четвертая страницы внутренней обложки (200×290 мм)
- Вклейка А4 (200×290 мм)
- Разворот А3 (400×290 мм)
- 0,5 А4 (185×130 мм)
- 0,25 А4 (90×130 мм)

Технические требования к рекламным материалам

- Размер журнала после обрезки 200×290 мм

- В рекламных макетах, для текста, логотипов и других элементов необходимо отступать от края модуля на 5 мм с целью избежания потери части информации

Все файлы в формате IBM PC

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

Стоимость рекламы и оплата

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

- Оплата в гривнях или рублях РФ по официальному курсу
- Для организаций-резидентов Украины цена с НДС и налогом на рекламу
- Для постоянных партнеров предусмотрена система скидок
- Стоимость публикации статьи на правах рекламы составляет половину стоимости рекламной площади
- Публикуется только профильная реклама (сварка и родственные технологии)
- Ответственность за содержание рекламных материалов несет рекламодатель

Контакты:

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

Подписано к печати 05.11.2012. Формат 60×84/8. Офсетная печать.
Усл. печ. л. 9,04. Усл.-отт. 9,89. Уч.-изд. л. 10,24 + 4 цв. вклейки.
Печать ООО «Фирма «Эссе».



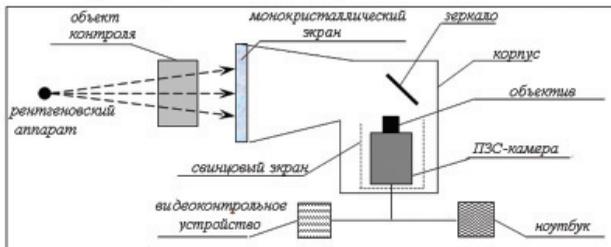
Национальная
академия
наук Украины

Портативная рентгенотелевизионная система

Институтом электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины совместно с рядом организаций создана рентгенотелевизионная система (РТС) для выполнения рентгеноскопического контроля с цифровой обработкой результатов. При таком контроле отсутствуют промежуточные носители информации (рентгеновские пленки, полупроводниковые пластины) и средства химической обработки.

Система включает портативный рентгеновский аппарат, пульт управления, монокристаллический экран и ноутбук, которые располагаются в двух кейсах.

Структурная схема портативной РТС



Портативная РТС система



а - рентгеновский аппарат,
б - детектирующее устройство и ноутбук

Установка РТС на объекте контроля



Основные преимущества созданной РТС:

- высокая производительность и мобильность;
- высокая разрешающая способность и стабильность изображения;
- цифровая обработка изображения;
- возможность архивирования изображений;
- небольшие габариты;
- возможность контроля движущихся объектов.

Наблюдение рентгеновского изображения на экране ноутбука



Эта рентгенотелевизионная система обеспечивает чувствительность радиационного контроля 2,0 %, что соответствует чувствительности пленочных систем.

Ее использование снижает стоимость рентгеновского контроля в несколько раз. Запоминать и архивировать можно только нужную информацию (о зонах с дефектами и т.д.). Есть возможность напечатать заключение о состоянии объекта контроля, указав вид и размер обнаруженных дефектов.

Контакты:

тел. (044) 200-46-66, 200-80-57,
факс (044) 205-31-66.
E-mail: ndt@paton.kiev.ua

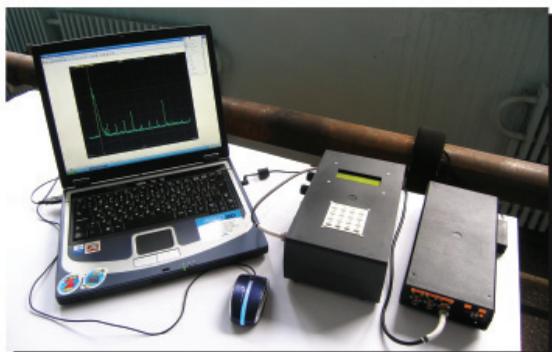


Новая система ультразвукового контроля для определения коррозионного износа трубопроводов Универсал – 1П

23 научные организации из 12 европейских стран выполняли проект «Мониторинг состояния объектов посредством дальнедействующего ультразвука» (LRUCM), который включен в 6-ю Рамочную Программу Европейского Союза.

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины и

Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики являлись участниками Проекта и работают над продвижением этой новой технологии в Украине и странах СНГ.



Антенна и узлы системы УЗ-контроля



УЗ-сигналы от дефектов
и сварных швов трубопровода

Система основана на использовании направленных волн, способных распространяться на большие расстояния от места закрепления антенны, что позволяет по эхо-сигналам обнаруживать коррозионные поражения и другие дефекты на расстоянии до 100 м.

Установка Универсал-1П на трубопроводе



Технические характеристики ультразвуковой системы:

- Диаметр контролируемых труб - 50... 300 мм;
- Дальность контроля до 100 м (зависит от покрытия и состояния трубы);
- Величина «мертвой зоны антенны» - 1 м;
- Разрешающая способность ~30 см;
- Время установки акустической антенны – 3... 5 мин;
- Питание системы - автономное.

Контакты:

Тел.: (044) 200-46-66, Факс: (044) 205-31-66

E-mail: ndt@paton.kiev.ua



НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОСВАРКИ им. Е.О. ПАТОНА НАН УКРАИНЫ

Международная конференция
**СВАРКА И РОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ —
НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ**

25–26 ноября 2013 г.
Украина, г. Киев



Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины проводит 25–26 ноября 2013 г. в Киеве международную конференцию «Сварка и родственные технологии — настоящее и будущее»

НАУЧНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ КОНФЕРЕНЦИИ

- технологии, материалы и оборудование для сварки и родственных технологий;
- прочность сварных соединений и конструкций, теоретические и экспериментальные исследования напряженно-деформируемых состояний и их регулирование;
- новые конструкционные материалы;
- неразрушающий контроль и техническая диагностика;
- совершенствование и оптимизация сварных конструкций, автоматизация их расчета и проектирования, оценка и продление ресурса;
- инженерия поверхности;
- сварка в медицине, технологии, оборудование, конструкционные и функциональные материалы;
- экологические проблемы в области сварки и родственных технологий;
- перспективные направления специальной электрометаллургии;
- стандартизация, сертификация продукции сварочного производства, подготовка и аттестация специалистов.

Рабочие языки конференции: украинский, русский, английский

АДРЕС:

ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины
Украина, 03680
г. Киев, ул. Боженко, 11
факс: (38044) 528–04–86
E-mail: office@paton.kiev.ua
www.paton.kiev.ua





Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины
НИИ лазерной техники и технологии
НТУУ «Киевский политехнический институт»
Международная ассоциация «Сварка»

Шестая международная конференция **ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СВАРКЕ И ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ**

28 мая - 1 июня 2013 г.

Украина, Крым, Большая Ялта, пос. Кацивели

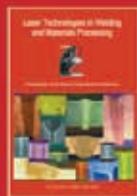
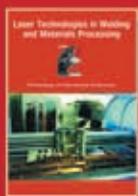
Председатели программного комитета
академик Б.Е. Патон
проф. В.С. Коваленко

Тематика конференции

*Лазерная
сварка, резка,
наплавка, термообработка,
нанесение покрытий,
прототипирование.*

*Лазеры в медицине и биологии.
Гибридные технологии и
технологии, базирующиеся
на других высококонцентрированных
источниках энергии.*

ОБОРУДОВАНИЕ ♦ ТЕХНОЛОГИИ ♦ МОДЕЛИРОВАНИЕ



Труды конференций
2003, 2005, 2007, 2009 гг.



Основные даты

Окончание приема тезисов — 19 марта 2013 г. Подтверждение участия — 9 апреля 2013 г.
Рабочий язык конференции английский (будет обеспечен синхронный перевод с русского на английский)



АДРЕС ОРГКОМИТЕТА:

Украина, 03680, г. Киев, ул. Боженко, 11
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины
Тел./факс: (38044) 200-82-77, 200-81-45

E-mail: journal@paton.kiev.ua, kovalenko.volodymyr@gmail.com; <http://www.paton.kiev.ua>