

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.),
И. П. Белокур, Ю. К. Бондаренко,
В. Л. Венгринович, Э. Ф. Гарф,
А. А. Грузд, Ю. Б. Дробот,
Н. Н. Зацепин, В. И. Иванов,
О. М. Карпаш, В. В. Клюев,
Л. М. Лобанов, А. А. Лебедев,
В. К. Лебедев, Г. Г. Луценко,
Н. В. Новиков, Е. С. Переверзев,
П. П. Прохоренко, В. П. Радько,
В. Н. Учанин, А. А. Улитко,
А. И. Степаненко,
В. А. Стрижало, А. Я. Тетерко,
Т. М. Швец, И. Я. Шевченко

Адрес редакции

03680, Украина, г. Киев-150,
ул.Боженко, 11

Институт электросварки
им.Е.О.Патона НАН Украины
Тел.: (044) 271-23-90,

Факс: (044) 528-34-84, 529-26-23

E-mail: journal@paton.kiev.ua

http://www.nas.gov.ua/pwj

Научные редакторы

Н. Г. Белый, А. А. Грузд

Электронная верстка

Л. Н. Герасименко,
И. Р. Наумова, И. С. Баташева

Свидетельство

о государственной регистрации
КВ 4787 от 09.01.2001

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

При перепечатке материалов
ссылка на журнал обязательна

За содержание рекламных
материалов редакция журнала
ответственности не несет

Цена договорная

СОДЕРЖАНИЕ

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

- УЧАНИН В. Н.* Вихретоковые методы выявления дефектов в
зоне заклепок многослойных авиационных конструкций 3
- КОВАЛЬ П. М., СКАЛЬСКИЙ В. Р., СТАШУК П. М., ЛОТОЦКИЙ
Ю. Л., ПЛАХТИЙ Р. М.* Акустико-эмиссионное обследование
технического состояния мостов 13
- МИКИТИН Г. В., КЛИМ Б. П., ПОЧАПСКИЙ Е. П., ДМИТРИВ З. В.*
Метрологический подход к использованию метода акустической
эмиссии для неразрушающего контроля материалов и конструкций 20
- ГЕЛЬМАН Л. М.* Диагностика сигналов: сравнение обеих компонент
преобразования Фурье и спектральной плотности мощности 26
- ГОРДЕЛИЙ В. И., ЧАБАНОВ В. Е.* Особенности конструирования
наклонных ЭМА-преобразователей 30
- САПРИКІН С. О.* Прилади та методи віброконтролю і
вібродіагностування газоперекачувальних агрегатів та компре-
сорних установок газотранспортної системи України 33
- БЕЗЫМЯННЫЙ Ю. Г., ТАТЬКО О. В.* Анализ возможностей
акустических методов по выявлению дефектности контактов в
порошковых материалах 39
- ЛУМИРОВСКАЯ Л. И., СОКОЛИНСКАЯ И. Г., МЯСИЦЕВА А. С.,
СИМОЧКИНА О. Т.* Неразрушающий контроль качества термообра-
ботки звеньев цепей методом магнитной структуроскопии 46
- КАРПАШ М. О., КІСІЛЬ І. С., КАРПАШ О. М., МОЛОДЕЦЬКИЙ І. А.*
Застосування комплексного підходу до визначення фізико-
механічних характеристик нафтогазового обладнання 49
- БАСОВ Г. Г., МАРКОВ В. Л., КИРЕЕВ А. Н.* Применение АРД-диаг-
грамм при ультразвуковом контроле в радиальном направлении
катаных колесных центров локомотивов 53
- МЕШКОВ С. Н., ОРЕЛ Р. П., МАСЛОВА В. А.* Термографическое
обследование гидротехнических сооружений Днепровской ГЭС 56

ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ

- СЕЛЬСКИЙ А. А., ГОРДЕЛИЙ В. И.* О контроле железнодорожных
рельсов низкочастотными волнами нормального типа 61
- Неделя промышленных технологий 63
- 5-я Национальная научно-техническая конференция и выставка
«Неразрушающий контроль и техническая диагностика» 64
- 11-а Міжнародна науково-технічна конференція «Леотест-2006»
в Славську 66
- АНТК имени О. К. Антонова — ведущий центр новейших
технологий 67
- Поздравляем юбиляра! 69

ИЗДАНИЕ ЖУРНАЛА ПОДДЕРЖИВАЮТ:

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



Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики

TECHNICAL DIAGNOSTICS and NON-DESTRUCTIVE TESTING

№ 2, 2006

Founded in January, 1989

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

Publisher: *International Association «Welding»*

EDITORIAL BOARD:

Editor-in-Chief
B. E. PATON

A. Ya. Nedoseka (vice-chief ed.),
V. A. Troitsky (vice-chief ed.),
Z. A. Maidan (exec. secr.),
I. P. Belokur, Yu. K. Bondarenko,
V. L. Vengrinovich, E. F. Garf,
A. A. Gruzd, Yu. B. Drobot,
V. I. Ivanov, O. M. Karpash,
V. V. Klyuev, L. M. Lobanov,
A. A. Lebedev, V. K. Lebedev,
G. G. Lutsenko, N. V. Novikov,
E. S. Pereverzev,
P. P. Prokhorenko, V. P. Radko,
I. Ya. Shevchenko,
A. I. Stepanenko, V. A. Strizhalo,
A. Ya. Teterko, V. N. Uchanin,
A. F. Uliitko, T. M. Shvets,
N. N. Zatsepina,
A. V. Shimanovsky

Address:

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

Scientific editors:

N. G. Bely, A. A. Gruzd

Electron galley:

I. R. Naumova, L. N. Gerasimenko,
I. S. Batasheva

State Registration Certificate
KV 4787 of 09.01.2001

All rights reserved.
This publication and
each of the articles
contained here in are
protected by copyright.
Permission to reproduce material
contained in this journal
must be obtained
in writing from the Publisher.

CONTENTS

NON-DESTRUCTIVE TESTING

<i>UCHANIN V. N.</i> Eddy current methods of detection of defects in the zone of rivets on multilayer aircraft structures	3
<i>KOVAL P. M., SKALSKII V. R., STASHUK P. M., LOTOTSKII Yu. L., PLAKHTII R. M.</i> Acoustic-emission examination of technical condition of brides	13
<i>MIKITIN G. V., KLIM B. P., POCHAPSKII E. P., DMITRIEV Z. V.</i> Metrological approach to application of the method of acoustic emission for NDT of materials and structures	20
<i>GELMAN L. M.</i> Signal diagnostics: comparison of both components of Fourier transform and spectral power density	26
<i>GORDELII V. I., CHABANOV V. E.</i> Features of design of EMA transducers operating at inclined angles	30
<i>SAPRIKI S. O.</i> Instruments and methods of vibrotesting and vibrodiagnostics of gas-pumping and compressor units of gas-transportation systems of Ukraine	33
<i>BEZIMYANNII Yu. G., TALKO O. V.</i> Analysis of the possibilities of acoustic methods to reveal defective contacts in powdered materials	39
<i>LUMIROVSKAYA L. I., SOKOLINSKAYA I. G., MYASISHCHEVA A. S., SIMOCHKINA O. T.</i> Non-destructive testing of the quality of heat treatment of chain links by the method of magnetic structuroscopy	46
<i>KARPASH M. O., KISIL I. S., KARPASH O. M., MOLODETSKII I. A.</i> Use of an integrated approach to determination of physico-mechanical characteristics of oil-and-gas equipment	49
<i>BASOV G. G., MARKOV V. L., KIREEV A. N.</i> Application of ARD-diagrams in ultrasonic testing of rolled wheel spiders of locomotives in the radial direction	53
<i>MESHKOV S. N., OREL R. P., MASLOVA V. A.</i> Termographic examination of hydraulic structures of the Dvievprovskii HPS	56

NEWS AND INFORMATION

<i>SELSKII A. A., GORDELII V. I.</i> On testing railway rails by normal-type low-frequency waves	61
Week of industrial technologies	63
5th National scientific-technical conference and exhibition «Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics»	64
11th International Scientific-Technical Conference «Leotest-2006» in Slavsk	66
O. K. Antonov ANTK as a leading center of advanced technologies	67
Jubilee congratulations!	69

Concerning publication of articles, subscription and advertising, please, contact the editorial board



ВИХРЕТОКОВЫЕ МЕТОДЫ ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В ЗОНЕ ЗАКЛЕПОК МНОГОСЛОЙНЫХ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В. Н. УЧАНИН

Рассмотрена проблема выявления дефектов в зоне заклепок многослойных авиационных конструкций вихретоковым методом и представлены различные подходы к ее решению. Предложена классификация различных способов контроля зоны заклепок и проведен сопоставительный анализ их достоинств и недостатков. Представлены новые вихретоковые преобразователи для контроля зоны заклепок в статическом и вращательном режиме и результаты их исследования.

The paper deals with the problem of defect detection in the zone of rivets of multiyear aircraft structures by eddy current method and presents various approaches to its solution. Classification of different methods of controlling the rivet zone is suggested, and comparative analysis of their advantages and disadvantages is performed. New eddy current transducers for control of the rivet zone in the static and rotary mode and results of their examination are presented.

Введение и постановка задачи. Большинство элементов современных авиационных конструкций представляют собой многослойные неразъемные узлы с большим количеством крепежных деталей (заклепок, болтов, штифтов и т. д.), которые ослабляют конструкцию и являются зоной концентрации напряжений. Поэтому индивидуальная оценка технического состояния и контроль зоны крепежных отверстий являются очень важным звеном при проведении работ по продлению ресурса самолетов и реализации концепции допустимого повреждения [1–3]. Наиболее эффективным для контроля зоны отверстий является вихретоковый метод, на основе которого разработано большое количество технологий контроля. Важным преимуществом технологий вихретокового контроля является возможность выявления дефектов усталостного и коррозионного происхождения во внутренних слоях многослойных конструкций, в том числе без демонтажа крепежных элементов и без разборки конструкций [4–9]. Это позволяет эффективно использовать вихретоковый метод контроля зоны заклепок не только во время ремонта авиационной техники, когда имеется возможность для демонтажа крепежных элементов [10], но и непосредственно во время испытаний и эксплуатации [6–8, 11–12]. В этом случае используют низкие рабочие частоты и низкочастотные вихретоковые преобразователи (ВТП) для обеспечения большой глубины проникновения вихревых токов. Чувствительность к дефектам в случае их залегания во внутренних слоях многослойных конструкций резко уменьшается из-за скин-эффекта, влияние которого оценивается расчетной величиной, называемой стандартной глубиной проникновения вихревых токов δ [13]. Эта величина рассчитывается в зависимости от параметров контролируемого материала (удельной электропроводности и магнитной проницаемости) и рабочей частоты из соотношений для плоской электромагнитной волны.

Понятно, что величина δ является скорее характеристикой материала, чем параметром вихретокового контроля, так как известно, что плотность вихревых токов за пределами этой величины вполне достаточна для получения информации о состоянии этих слоев материала вихретоковым методом. Поэтому введено понятие реальной глубины проникновения вихревых токов, величина которой оценивается равной $2,8\delta$ [13, 14]. Наши исследования показали, что реальная глубина залегания выявляемых дефектов может значительно превышать теоретически установленные пределы, которые определяются стандартной или реальной глубиной проникновения вихревых токов [15]. Поэтому нами была предложена концепция «ограниченной шумами глубины проникновения вихревых токов» [16], из которой логично следует концепция «ограниченной шумами глубины залегания выявляемых дефектов» [9]. В указанных работах показано, что единственным ограничителем для достижения нужной глубины контроля является уровень шумов, и предложены методики определения этого параметра для реальных условий контроля. Поэтому для эффективного выявления дефектов в зоне заклепок исключительно важно обеспечить низкий уровень шумов. Сложность проблемы заключается в том, что заклепка даже без дефекта является дополнительным источником сигналов помех. Это связано с тем, что она является своего рода допустимым дефектом, от влияния которого нужно отстроиться. Кроме того, параметры конструкции в зоне заклепки могут варьировать, что служит дополнительным источником помех. В частности, могут изменяться диаметр заклепки и отверстия, удельная электропроводность материала заклепки, расстояние между склепанными слоями конструкции, толщина защитного лакокрасочного покрытия и т. д. Более того, при некачественной технологии производства может иметь место овальность отверстия под заклепку и самой заклепки или нарушена форма ее

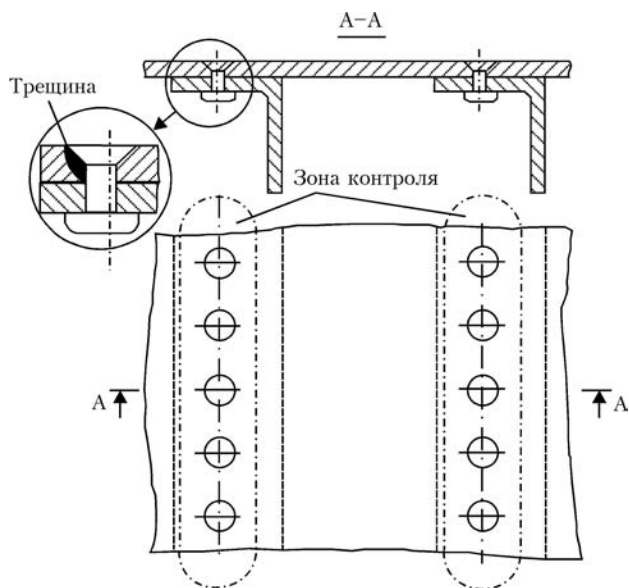


Рис. 1. Схема типичного простейшего авиационного узла типа «стрингер-обшивка» с заклепочным рядом

головки. Для устранения влияния этих факторов необходим комплекс специальных мер, среди которых наиболее важным является *выбор конструкции вихретокового преобразователя*.

Таким образом, проблема выявления дефектов многослойных узлов из алюминиевых сплавов в зоне заклепочных соединений без разборки и удаления заклепок является одной из наиболее критичных и сложных проблем НК в авиационной промышленности. Представленная проблема становится особенно актуальной для обеспечения надежной долгосрочной эксплуатации самолетов, время работы которых превысило первоначально заданный срок, а также для реализации концепции допустимого повреждения.

Типичный пример простейшей авиационной двухслойной конструкции, в которой стрингер соединяется с внешней обшивкой самолета регулярным рядом потайных заклепок, приведен на рис. 1. Штрих-пунктирной линией выделена зона контроля. На выноске показано расположение возможной трещины. Во многих случаях опасными признаются трещины, которые не выходят за головку заклепки. В общем случае количество соединенных слоев может быть большим, и дефекты

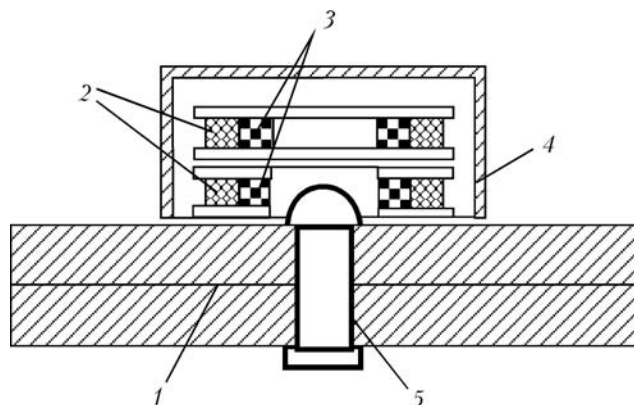


Рис. 2. Конструкция ВТП кольцевого типа

могут быть расположены во внутренних слоях. Потайными заклепками в большинстве случаев присоединяют элементы конструкции к внешней обшивке самолета. Внутренние соединения часто выполняют при помощи заклепок с головками разнообразной формы. В некоторых случаях используют болтовые соединения.

Классификация способов вихретокового контроля зоны заклепок. Все технологии вихретокового контроля заклепочных соединений по характеру сканирования контролируемой зоны можно условно разделить на три основные группы: 1) статический способ — проводится путем установки ВТП на заклепку или рядом с ней; 2) скользящий способ — проводится при постепенном перемещении ВТП вдоль ряда заклепок или около него; 3) вращательный способ — ВТП устанавливается на заклепку и вращается вокруг нее вручную или при помощи двигателя.

Эти способы используют для выявления дефектов как во внешней обшивке, так и во внутренних слоях многослойных конструкций. При этом технологии каждой группы имеют свои достоинства и недостатки, поэтому возможность и эффективность их применения определяется особенностями авиационной конструкции и требуемым уровнем чувствительности и глубины контроля.

В отдельную группу можно вынести способы вихретокового контроля с двумерной визуализацией распределения сигнала ВТП по поверхности в зоне заклепки. Эти технологии в большинстве случаев предусматривают построчное сканирование контролируемой поверхности и применяются преимущественно для обнаружения поверхностных дефектов.

Статический способ. Для реализации технологий этой группы используют ВТП кольцевого типа («Ring Probe» или «Encircling Probe» [12]). Конструкция ВТП кольцевого типа представлена на рис. 2. Кольцевой ВТП для контроля зоны заклепок состоит из двух, подключенных последовательно генераторных обмоток 3, и двух дифференциально включенных измерительных обмоток 2. Характерной особенностью кольцевого ВТП является наличие центрального отверстия в корпусе 4 ВТП, диаметр которого соответствует диаметру заклепки 5, соединяющей многослойную конструкцию 1. Соответственно для заклепок разного типа и размера изготавливают ВТП с разным диаметром отверстия. По своей физической сущности кольцевые ВТП относятся к ВТП абсолютно компенсированного типа, в которых для уменьшения небаланса генераторная и измерительная обмотки разделены на две идентичные части: основную и компенсационную. Компенсационная часть обмоток размещена непосредственно над основной. Основная и компенсационная части измерительной обмотки включены встречно.

Специальный кольцевой ВТП типа ARK 1/8 разработан нами в Центре «Леотест-Медиум» (г. Львов) для проведения контроля зоны заклепок гермошпангоута самолетов «Боинг-747», которые эксплуатируются украинскими гражданскими авиакомпаниями. Разработанный ВТП обеспечивает

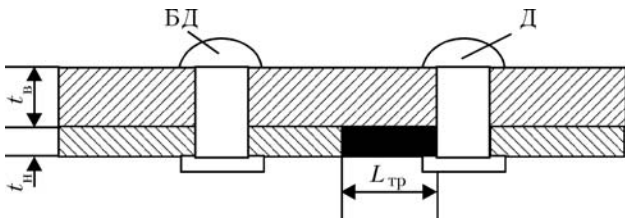


Рис. 3. Схематическое изображение контрольного образца для настройки дефектоскопа при выявлении трещин в зоне заклепок под обшивкой толщиной 1,8 мм ($t_{\text{в}} = 1,8$ мм и $t_{\text{н}} = 0,8$ мм; $L_{\text{тр}} = 5$ мм)

выявление трещин длиной $L_{\text{тр}}$ более 5 мм во втором слое двухслойной конструкции из алюминиевого сплава (толщины слоев: верхнего $t_{\text{в}} = 1,8$ мм и нижнего $t_{\text{н}} = 0,8$ мм) в зоне заклепок с диаметром головки 8 мм. Для настройки кольцевого ВТП используется стандартный образец из пластин соответствующей толщины (см. рис. 3). Стандартный образец имеет заклепку без дефекта (БД) и с дефектом (Д), что соответствует необходимой чувствительности контроля (5 мм). Искусственный дефект типа трещина был изготовлен электроэрозионным методом и имеет раскрытие 0,1 мм. Разработанный ВТП типа ARK 1/8 отличается от стандартных кольцевых датчиков значительно меньшей высотой (11,6 мм для ARK 1/8 против 25 мм для ВТП немецкой фирмы «Rohmann»). Это позволило проводить контроль в зонах с ограниченным доступом, которые имеют место в самолетах этого типа. ВТП типа ARK 1/8 был адаптирован для работы в составе дефектоскопов типа ELOTEST фирмы Rohmann с помощью четырехштырькового разъема фирмы «Fischer». Диапазон рабочих частот от 600 Гц до 10 кГц. Для установки на головку заклепки ВТП имеет внутреннее отверстие диаметром 8,3 мм. Необходимо отметить, что в дальнейшем был разработан кольцевой ВТП типа ARK 2/8 высотой 9,5 мм, чувствительность которого полностью соответствует чувствительности ВТП типа ARK 1/8. Это позволило еще больше расширить зону возможного контроля.

Методика контроля с помощью кольцевого ВТП предусматривает использование комплексной плоскости для разделения сигналов от дефектов и изменений зазора между ВТП и контролируемой поверхностью. Для нашего случая сигналы от зазора и дефекта во внутреннем слое на рабочей частоте 3 кГц отличаются по фазе приблизительно на 90° . Поэтому, при установке ВТП на бездефектную заклепку образца (см. рис. 3) регулируют поворот комплексной плоскости таким образом, чтобы ориентировать годографы сигналов при вариациях зазора в горизонтальном направлении. В этом случае при установке ВТП на заклепку с дефектом годограф сигнала имеет вертикальное направление. Преимуществом технологий этого типа является простота и относительно высокая производительность контроля. К недостаткам следует отнести возможное влияние большого количества мешающих факторов, которые во многих случаях невозможно учесть. На сигнал кольцевого ВТП влияют вариации диаметра отверстия

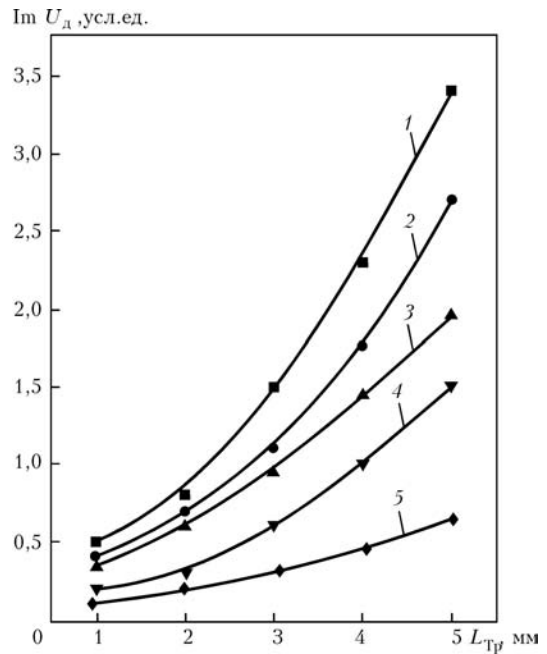


Рис. 4. Зависимость сигнала кольцевого датчика от длины трещины $L_{\text{тр}}$ для разных толщин верхней обшивки $t_{\text{в}}$, мм: 1 — 0; 2 — 0,5; 3 — 1,0; 4 — 1,5; 5 — 2,0

или заклепки, изменения электропроводности материала заклепки, изменения толщины слоев или промежутка между слоями многослойного объекта контроля, изменения толщины защитного покрытия и т. п. Поэтому на практике по этой технологии решают задачи выявления достаточно длинных сквозных трещин. В частности, в приведенном примере порог чувствительности, на который настраивался дефектоскоп, составлял 5 мм по длине (трещина сквозная).

Проведенные исследования показали, что существует зависимость между амплитудой (в нашем случае Y-составляющей) сигнала и длиной трещины, которая, в принципе, может быть использована для количественной оценки параметров выявления трещин. На рис. 4 приведена зависимость между амплитудой сигнала $U_{\text{д}}$ кольцевого ВТП типа ARK 1/8 в условных величинах (делениях шкалы индикатора) от длины трещины $L_{\text{тр}}$ для различных толщин $t_{\text{в}}$ верхней обшивки ($t_{\text{в}} = 0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0$ мм).

Необходимо обратить внимание на то, что приведенная зависимость получена в лабораторных условиях, когда действие перечисленных выше мешающих факторов было полностью исключено. Только поэтому можно было получить надежные сигналы от трещин длиной 1 мм и более. На практике при проведении количественной оценки параметров выявленных трещин влияние перечисленных факторов также необходимо учитывать.

В случае же, когда направление распространения трещины от заклепки известно, можно использовать другой вариант статического способа, при котором используют ВТП меньших размеров и без центрального отверстия. Все процедуры методики контроля в этом случае подобны методике, описанной выше для кольцевого ВТП. Отличие состоит в том, что ВПГ устанавливают сбоку зак-

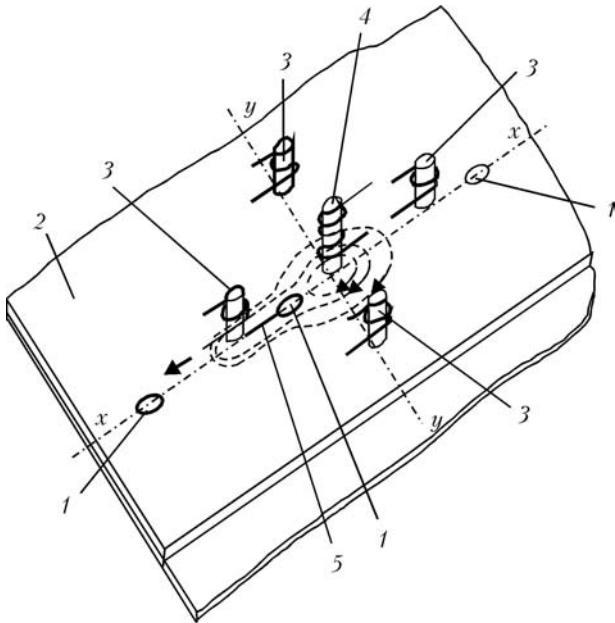


Рис. 5. Конструкция скользящего ВТП

лепки. Для такого варианта реализации статического способа используют абсолютно компенсированные ВТП, подобные представленным на рис. 2. Эти ВТП изготавливают без центрального отверстия, благодаря чему они, в отличие от кольцевого ВТП, могут быть изготовлены значительно меньшего диаметра, что улучшает их разрешающую способность. По такому варианту статического способа при помощи ВТП диаметром 7,6 мм контролируют, в частности, отдельные детали самолета БОИНГ-737.

Скольльзящий способ. При реализации технологий второй группы ВТП перемещают вдоль ряда заклепок. В большинстве случаев центр ВТП перемещается вдоль оси, соединяющей центры заклепок. В случае контроля ряда заклепок с головками на рабочей поверхности ВТП делают паз, ширина и глубина которого соответствует диаметру и высоте головки заклепок. В англоязычной литературе такие ВТП называют «Slide» или «Sliding probe» (при дословном переводе – «скользящий датчик»). Один из вариантов конструкции скользящего ВТП представлен на рис. 5 [17].

Представленный скользящий ВТП состоит из одной центральной обмотки возбуждения 4 и четырех измерительных обмоток 3, которые расположены симметрично и соединены последовательно. ВТП устанавливают на контролируемый многослойный узел 2 с рядом заклепок 1. Сканирование проходит по оси $x-x$, которая соединяет центры заклепок. Направление сканирования на рис. 5 показано стрелками. При наличии в заклепке дефекта типа трещина 5, происходит перераспределение контуров вихревых токов (показано на рис. 5 штриховой линией), которые отличаются от контуров вихревых токов в случае бездефектной заклепки.

Годографы сигналов при проведении контроля заклепок с помощью скользящего ВТП наблюдаются в комплексной плоскости (рис. 6), для чего могут быть использованы универсальные вихревые дефектоскопы. На рис. 6, а представлены характерные годографы сигнала скользящего ВТП от бездефектной заклепки [17]. После проведения компенсации небаланса ВТП направление годографа от бездефектной заклепки поворотом комплексной плоскости располагают в горизонтальном направлении. Контурной линией на рис. 6, а выделена зона, в которой могут проходить годографы сигналов от бездефектной заклепки при случайном смещении ВТП от центральной оси сканирования. Отклонение годографа сигнала от бездефектной заклепки в вертикальном направлении не превышает величины y_0 . На рис. 6, б показан типичный годограф сигнала от заклепки с продольной трещиной 5 (рис. 5), который имеет форму характерной петли. Из представленных годографов очевидно, что оператор достаточно легко может отличить годографы от дефектной заклепки от сигналов бездефектной заклепки. Можно также выделить сектор комплексной плоскости для настройки автоматической сигнализации дефектоскопа. В нашем случае это будет выделенный штриховыми линиями правый верхний сектор, который соответствует критерию $y \leq y_0$ и $x \leq -x_0$.

Для контроля заклепок скользящим способом предложены также ВТП, в которых генераторные и измерительные обмотки установлены на отдельных сердечниках и разнесены на относительно большое расстояние [18, 19]. В англоязычной ли-

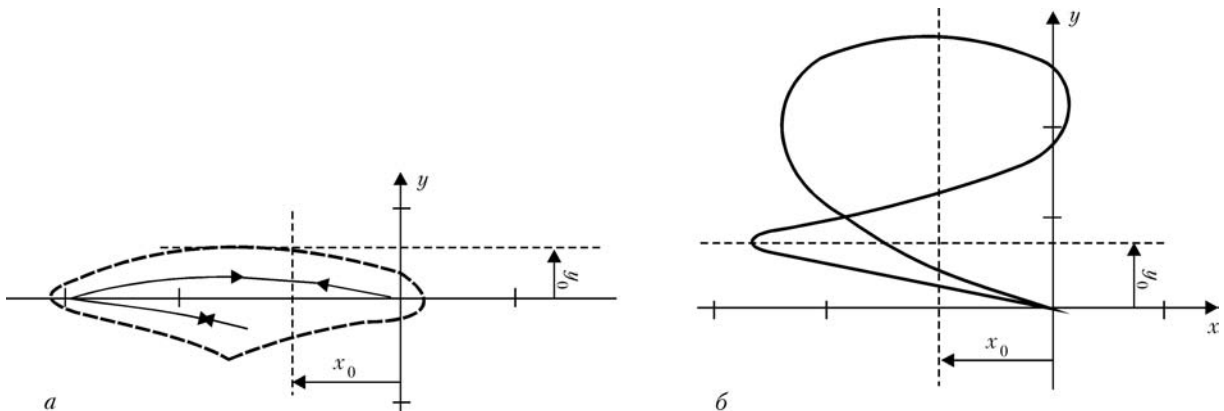


Рис. 6. Типовые годографы сигналов от скользящего ВТП при сканировании бездефектной заклепки (а) и заклепки с продольной трещиной (б)

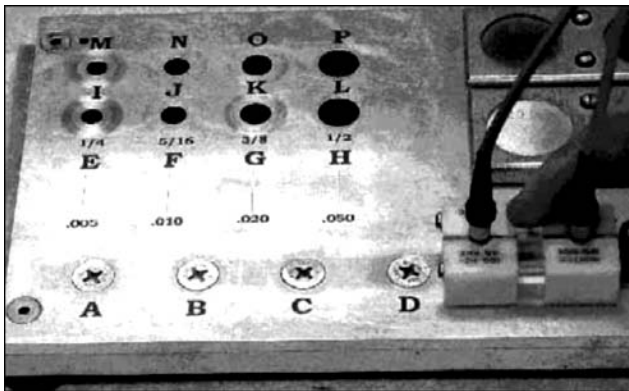


Рис. 7. Скользящий ВТП со сменной вставкой между обмотками

температуре такие ВТП называют «sliding driver/receiver probe». В некоторых конструкциях таких ВТП расстояние между генераторной и измерительной обмотками может регулироваться для изменения глубины проникновения вихревых токов в зависимости от глубины залегания трещин, которые необходимо выявлять. Внешний вид такого варианта ВТП с диэлектрическими вставками, регулируемыми расстояние между обмотками, приведен на рис. 7. ВТП установлен на стандартный образец с заклепками (A, B, C, D), около которых электроэрозионным методом вырезаны тонкие дефекты типа трещины разной длины (одна заклепка установлена в бездефектной зоне). Недостатком таких ВТП есть, на наш взгляд, большой сигнал небаланса ВТП при установке на бездефектный материал. Это может приводить к помехам, связанным, в частности, с изменениями зазора между ВТП и контролируемой поверхностью, неоднородностью удельной электропроводности и т. п.

Основным преимуществом скользящего способа контроля есть его высокая производительность, которая даже превышает производительность статического способа с применением кольцевого ВТП. Однако имеется ряд ограничений, среди которых недостаточная чувствительность, особенно к трещинам, расположенным перпендикулярно направлению сканирования. Другим ограничением является требование регулярности расположения заклепок, т. е. они должны быть расположены на одинаковом расстоянии. Поэтому этот способ эффективен в случаях, когда направление возможной трещины заранее известно и совпадает с направлением регулярного ряда заклепок, а требования к чувствительности невысокие.

Скользящий способ контроля зоны заклепок может быть успешно реализован при помощи мультидифференциальных ВТП. Особенностью этих ВТП, определяющей их преимущество при контроле зоны заклепок, есть очень высокая степень компенсации небаланса и, соответственно, подавление помех. Для типовых заклепок, используемых в авиации, могут быть использованы ВТП типа Леотест МДФ 1501 и МДФ 1701 [20, 21].

К скользящему способу можно отнести технологии контроля, которые предусматривают сканирование не через центры ряда заклепок, а на определенном расстоянии от них [4, 7, 19]. Автором этой статьи разработана эффективная методика

вихретокового контроля с целью выявления трещин, ориентированных под углом 90° к направлению заклепочного ряда. Методика предусматривает использование мультидифференциальных ВТП типа Леотест МДФ 1201 и МДФ 0901, которые удачно объединяют необходимую глубину контроля и высокую разрешающую способность с малыми размерами (12,5 и 9,0 мм соответственно). На основе предложенной методики хорошо выявляются усталостные трещины, расположенные поперек ряда заклепок и выходящие за головку заклепки на 2...3 мм. Методика обеспечивает достаточно высокую производительность контроля и возможность контроля анизотропных материалов. Однако, чувствительность при этом ограничена из-за помех в виде сигналов от заклепочных отверстий. Избавиться от помех можно на основе амплитудного разделения сигналов, при котором о наличии трещины свидетельствует превышение заданного порога сигнала, который выбирает больше уровня сигнала от отверстий без дефекта. Возможна также амплитудно-фазовая отстройка от влияния отверстий [4, 7].

Вращательный способ. Наилучшую чувствительность при контроле зоны заклепок имеют методики, построенные на вращении ВТП вокруг заклепки. Предыдущие технологии на основе кольцевого и вращательного способов позволяют выявлять преимущественно трещины, выходящие за пределы головки заклепки. Размер таких трещин может быть уже больше критического. На основе мультидифференциальных низкочастотных ВТП стало возможным разработать методику выявления трещин, которые не выходят за головку заклепки. Методика использует особенность конструкции ВТП, при которой обеспечивается высокий уровень компенсации небаланса при установке его соосно с заклепкой. Этот небаланс благодаря круговой симметрии сохраняется и при вращении ВТП вокруг заклепки. В частности, для контроля реальных авиационных конструкций из алюминиевого сплава Д16Т с потайными заклепками (диаметр головки 8 мм, диаметр отверстия 4 мм) нами совместно с АНТК «Туполев» разработана методика контроля на основе использования ВТП типа Леотест МДФ 1201, позволяющая выявлять трещины длиной более 1мм [22]. Важно, что для реализации этой методики могут использоваться относительно простые вихретоковые дефектоскопы со стрелочной или светодиодной индикацией изменений сигналов ВТП. Схема расположения ВТП относительно заклепки потайного типа и схема вращения сканирования при выявлении трещин под головкой заклепки представлена на рис. 8.

В соответствии с методикой ВТП 2 устанавливаются соосно с заклепкой при помощи специальной оправки из диэлектрика 3, проводят компенсацию небаланса и наблюдают за изменениями контролируемого сигнала при вращении ВТП (рис. 8). В случае вращения ВТП над бездефектной заклепкой баланс не нарушается. При наличии дефекта 1 баланс нарушается. Для реализации методики достаточно обеспечить вращение в обе стороны на угол от 45° до 90° . В случаях,

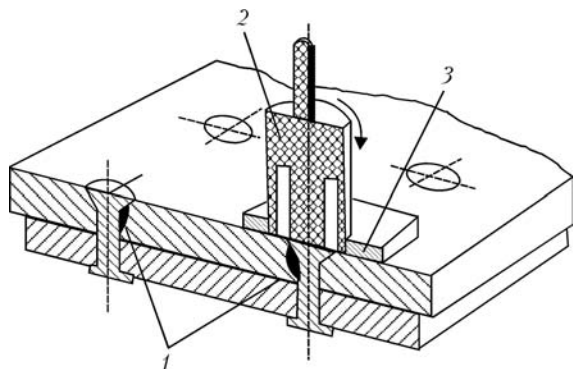


Рис. 8. Схема установки ВТП и сканирования при выявлении трещин под головкой заклепки потайного типа

когда направление возможного распространения трещины известно, методика может быть усовершенствована. В частности, настройка может проводиться непосредственно на контролируемом изделии с заклепкой. При этом выбирают ориентацию ВТП таким образом, чтобы не чувствовать трещину. Угол вращения ВТП в таком случае может быть ограничен 45° . При контроле анизотропных по удельной электропроводности материалов применение этой методики усложняется. В этом случае необходимо проводить наблюдение сигналов на экране дефектоскопов универсального типа в комплексной плоскости, поворот которой выбирают таким образом, чтобы уменьшить влияние анизотропии на одну из компонент сигнала. Важно также обеспечить тщательное центрирование заклепки и ВТП, что может уменьшать производительность контроля [22].

Для выявления дефектов под выступающими над контролируемой поверхностью заклепками с округлыми и цилиндрическими головками (диаметр головки 10 мм, диаметр отверстия 6 мм) в

Львовском центре «Леотест-Медиум» был разработан специализированный ВТП типа Леотест МДФ 2201/10R. Этот ВТП имеет центральное отверстие соответствующего диаметра для установки его на заклепку. Диаметр ВТП — 22 мм, что обеспечивает возможность его установки на типовых расстояниях между заклепками. Отметим, что в этом случае нет необходимости применять диэлектрическую накладку для центрирования ВТП при вращении, так как ВТП центрируется самой заклепкой.

Специализированный ВТП типа Леотест МДФ 2201/10R исследовали на рабочей частоте 2 кГц с регистрацией сигнала в комплексной плоскости с помощью универсальной компьютерной вихревой системы на основе платы типа EddyMax фирмы «Test Maschinen Technik GmbH». Эксперимент проводился на образце из алюминиевого сплава Д16 с отверстием диаметром 6 мм, от которого электроэрозионным способом прорезаны искусственные дефекты типа трещины раскрытием 0,1 мм, длиной от 1 до 6 мм (через 1,0 мм). Образец с дефектом накрывался пластиной с отверстием диаметром 6 мм без дефекта и соединялся заклепкой. На рис. 9, а, б приведены годографы сигналов ВТП, полученные при вращении ВТП над образцом с трещиной длиной 1 мм (рис. 9, а) и 2 мм (рис. 9, б). На рис. 9, в и 9, г приведены сигналы от помех, которые получены путем вращения ВТП вокруг бездефектного образца (рис. 9, в) и поднятием ВТП над образцом на высоту приблизительно 3...4 мм (рис. 9, г). После установки ВТП на образец проводили компенсацию небаланса и поворот комплексной плоскости таким образом, чтобы сигнал от дефекта был вертикально направлен снизу доверху. Чувствительность при регистрации сигналов от трещины длиной 1 мм

и сигналов помех была одинаковой. Для трещины длиной 2 мм чувствительность была уменьшена на 12 дБ. Анализ годографов показывает, что длина трещины очень сильно влияет на амплитуду сигнала. В частности, сигнал от трещины длиной 2 мм больше, чем в три раза сигнала от трещины длиной 1 мм. При этом сигнал от трещины длиной 1 мм больше, чем на 6 дБ превышает уровень сигнала от основных помех, что подтверждает высокую селективность контроля с помощью представленного ВТП.

Сравнительные исследования показали, что представленный ВТП имеет лучшую чувствительность и селективность при выявлении дефектов во втором от поверхности слое, чем стандартные ВТП, предназначенные для решения той же задачи. Стандартные ВТП используют систему разнесенных генераторных и измерительных обмоток, которые расположены по разные стороны заклепки («sliding driver/receiver probe»). Как уже отмечалось выше, такой ВТП не является компенсированным, что определяет высокий уровень сигналов от по-

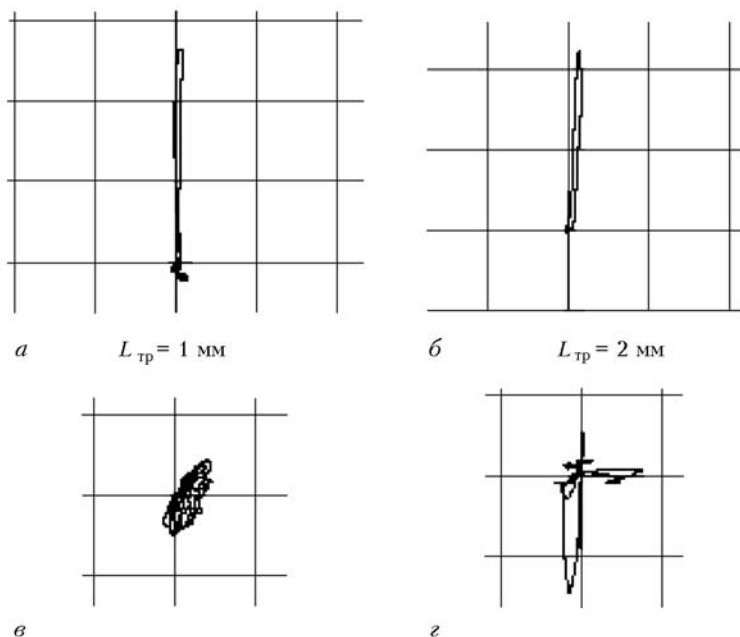


Рис. 9. Сигналы вращательного ВТП от дефектов типа трещина длиной 1 мм (а) и 2 мм (б) под головкой заклепки и обшивкой толщиной 2 мм, а также сигналы от помех при вращении над бездефектной заклепкой (в) и при изменении зазора (г)



мех. Это объясняет основное преимущество ВТП типа Леотест МДФ 2201/10R, которое состоит в высокой степени компенсации сигнала небаланса.

Дальнейшее улучшение селективности и чувствительности вращательного способа при контроле зоны заклепок может быть достигнуто на основе использования динамического метода обработки сигнала ВТП. Для реализации динамического метода в данном случае необходимо обеспечить высокую частоту вращения установленного над заклепкой ВТП. Для реализации такой технологии разработаны специализированные роторные сканеры, которые обеспечивают вращение ВТП вокруг заклепки [23,24]. Конструкция одного из вариантов ВТП и принцип вращательного метода выявления дефектов под заклепкой, реализованного в приборе Eddiscan [23], представлены на рис. 10.

На рис. 10 приведена типовая двухслойная конструкция из двух обшивок 3, соединенных при помощи заклепки 1. С целью обнаружения мелких трещин под головкой заклепки над ней с помощью двигателя вращается сканирующий преобразователь в виде П-образного ферритового сердечника 5 с обмоткой параметрического ВТП 4, размещенной на одном плече сердечника 5. Сканирующий преобразователь размещается таким образом, чтобы одно из плеч сердечника размещалось по центру заклепки. Таким образом, при вращении вокруг оси заклепки обеспечивается радиальное направление (относительно заклепки) первичного поля. При вращении над бездефектной заклепкой импеданс параметрического ВТП не изменяется, так как система «ВТП–объект контроля» симметрична относительно оси заклепки. Баланс нарушается в случае наличия дефектов в одном из слоев конструкции. ВТП возбуждается прямоугольными импульсами частотой 1 кГц. Подобная система контроля после определенной модернизации реализована в специализированном вихретоковом дефектоскопе для обнаружения трещин в зоне заклепок Nortec 30 Eddyscan. Но здесь, в отличие от приведенной выше, используется возбуждение прямоугольными импульсами с помощью неподвижной индуктивной обмотки, соосной с заклепкой, а на конце вращающегося по периферии вокруг заклепки П-образного сердечника установлен вместо индуктивной обмотки датчик Холла.

Дефектоскоп комплектуется разными роторными сканерами для контроля заклепок различного диаметра (от 5,7 до 12,1 мм). В документации на дефектоскоп декларируется возможность выявления трещин на глубине 6,35 мм (для немагнитных заклепок) и 12,7 мм (для ферромагнитных). Для такой технологии очень важно обеспечить точное центрирование роторного сканера относительно заклепки. Поэтому в приборе существует возможность центрирования роторного сканера при установке его на заклепки с помощью специального шаблона на экране. Производительность контроля согласно документации – 5 с на заклепку. Дефектоскоп Nortec 30 Eddyscan использовался в АНТК «АНТОНОВ». По результатам анализа конструкции ВТП и из опыта работы с прибором можно наряду с позитивными качест-

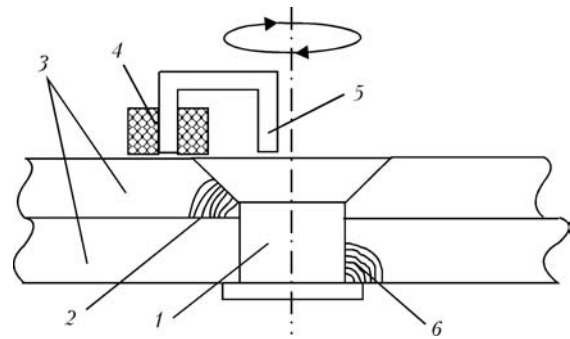


Рис. 10. Схема реализации вращательного метода выявления дефектов под головкой заклепки [24]: 1 – заклепка; 2 – дефект в верхнем слое; 3 – обшивки авиационной конструкции; 4 – индуктивная обмотка; 5 – ферритовый П-образный сердечник; 6 – дефект в нижнем слое

вами прибора указать на ряд недостатков, среди которых, кроме высокой стоимости дефектоскопа, влияние мешающих факторов: изменение промежутка между слоями многослойной конструкции, овальность заклепки и т.д. Кроме того, большой размер роторного сканера не позволяет проводить контроль во многих труднодоступных местах авиационных конструкций. Подобные системы контроля разрабатывают и другие известные фирмы. В частности, американская фирма «Foerster Instrument Incorporated» (www.foerstergroup.com) предлагает вихретоковую специализированную систему RIVET CHECK 2839 на основе использования портативного компьютера. В системе используются роторный сканер с двигателем, с помощью которого ВТП вращается вокруг заклепки. Обеспечивается наглядное центрирование роторного сканера над заклепкой по изображению на дисплее, который показывает, в каком направлении необходимо для этого переместить сканер. После проведения центрирования вихретоковая система автоматически запоминает данные, полученные при полном вращении ВТП. Программно обеспечивается оптимальный режим для обнаружения дефектов в определенном слое (первом, втором или третьем) конструкции из трех обшивок толщиной 1 мм каждый. Независимая экспертиза этого прибора (проведена NASA) показала, что система обеспечивает обнаружение трещин длиной 0,81 мм в первом слое с вероятностью обнаружения 0,9. Собственные исследования фирмы показали, что доработанный вариант системы обнаруживает трещины длиной 0,51 мм (в первом слое), 1,0 мм (во втором слое) и 2,5 мм (в третьем слое).

Следует отметить, что для контроля заклепок делаются попытки разработать более экзотичные конструкции, среди которых системы, использующие электромагнитное поле, которое вращается вокруг оси заклепки за счет различия фазы тока возбуждения пространственно разнесенных обмоток возбуждения или многоэлементные ВТП [25–27]. Но такие системы пока широко не используются.

Для анализа сигналов ВТП при контроле заклепок разрабатываются алгоритмы для автоматической идентификации обнаружения дефектов. В качестве примера приведем работу [28], в которой

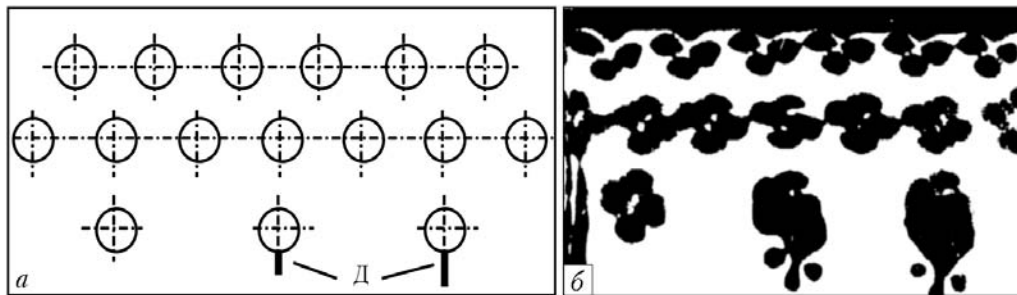


Рис. 11. Двухмерная визуализация фрагмента авиационной конструкции с дефектами в зоне заклепок: *a* — схема расположения заклепок и дефектов *D* на образце; *b* — полутоновая дефектограмма

рассмотрена возможность применения различных алгоритмов для предварительной обработки сигналов ВТП (медианная фильтрация, поворот сигнала в комплексной плоскости и нормализация), а также проанализированы четыре типа алгоритмов выделения информативных признаков (на основе простой технологии расчета вектора средних сигналов на интервале, расчета Фурье, использования вейвлет-преобразований и метода главных компонент). Для классификации сигналов применяли двухслойную искусственную нейронную сеть [29]. В итоге авторы определяют, что для поставленной задачи могут применяться все из проанализированных методов выделения информационных признаков. Разница состоит только в количестве коэффициентов, необходимых для достижения достаточной точности классификации дефектов по сигналам ВТП [28].

Широкие возможности для интерпретации результатов контроля зоны заклепок дают методы двухмерной визуализации [30, 31]. На рис. 11 приведены чертежи фрагмента неразъемного узла вертолета с заклепками (рис. 11, *a*) и двухмерная полутоновая дефектограмма его контроля (рис. 11, *b*). Фрагмент имеет три ряда заклепок (по шесть, семь и три заклепки в ряду — сверху вниз на рис. 11, *a*). В зоне двух заклепок третьего (нижнего на рис. 11, *a*) ряда во внешней обшивке есть усталостные трещины *D* эксплуатационного происхождения. На дефектограмме изображение от бездефектных заклепок представляет собой «розетку», количество лепестков которой обусловлено четырьмя отдельными зонами чувствительности при применении четырехэлементного дифференциального ВТП. Изображение от заклепки с дефектом существенно отличается от изображения бездефектной заклепки, которое при расшифровке диаграмм можно принять за «эталон».

Еще большие перспективы для выявления дефектов в зоне заклепок дают новые алгоритмы, реализующие принципы вихретоковой вычислительной томографии [32]. Подходы вихретоковой визуализации дают возможность послышной визуализации результатов контроля на заданной глубине. Созданные на сегодняшний день томографические системы вихретокового контроля не обеспечивают высокой производительности контроля и на практике широко не используются. Но уже полученные результаты показывают, что с повышением быстродействия средств вычислительной техники и разработкой «быстрых» алгорит-

мов, методы томографии будут создавать широкую перспективу при решении сложных задач вихретокового контроля, к которым относится и контроль зоны заклепок [32].

Для полноты картины представим методы выявления дефектов в зоне заклепок на основе визуализации с применением магнитооптического метода (в англоязычной литературе применяется аббревиатура MOI — Magneto-Optic Imaging) для регистрации распределения электромагнитных полей [33–35]. Объединение в магнитооптическом методе оптического и вихретокового метода позволяет проводить наблюдения в режиме реального времени изображений несплошностей в контролируемом материале. В основу этой технологии положен магнитооптический эффект Фарадея, состоящий во вращении плоскости поляризации линейно поляризованного света под действием магнитного поля, параллельного направлению прохождения света через прозрачный материал. Сегодня магнитооптическая техника использует в качестве чувствительных элементов специальные материалы, обеспечивающие очень высокое удельное вращение Фарадея. Это делает возможным практическое применение этого эффекта для прямого наблюдения аномалий электромагнитного поля, связанного с искажениями вихревых токов при наличии дефектов в электропроводной среде. Реализация магнитооптического метода возможна в двух режимах — проникающего и отраженного излучения. В нашем случае применяют режим отраженного излучения, что позволяет удвоить угол поворота плоскости поляризации за счет двухразового прохождения света через чувствительный элемент. Одним из требований при применении магнитооптических систем есть формирование в контролируемом объекте однородных токов. Для этого электромагнитное поле возбуждается в тонкой проводящей пленке, которая накладывается на контролируемый материал. Магнитооптическое изображение формируется в случае, когда несплошности изменяют распределение вихревых токов в материале, за счет чего появляются аномалии перпендикулярной (относительно контролируемой поверхности) составляющей электромагнитного поля.

На рис. 12 схематически представлено устройство формирования магнитооптического изображения в зоне заклепки, которое состоит из источника света *5* с поляризатором *4*, обмоток для формирования первичного электромагнитного поля *3*, чувствительного элемента в виде пластины из спе-

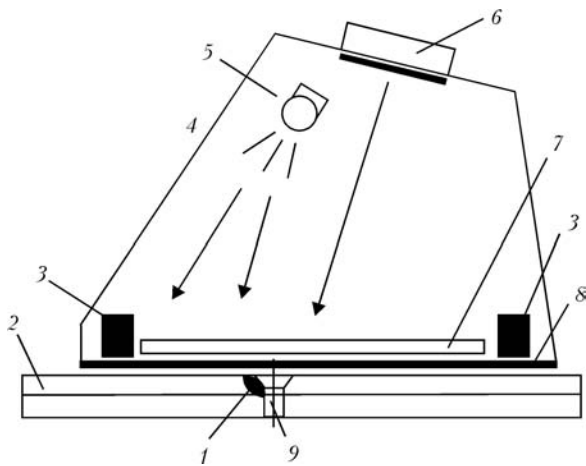


Рис. 12. Схема формирования магнитооптического изображения

циального материала 7, электропроводной пленки 8 и анализатора поляризованного света 6. Устройство накладывается на двухслойную конструкцию 2 с заклепкой 9, в зоне которой возможен дефект 1. Магнитооптические системы относительно нечувствительны к эффекту зазора, поэтому удаление краски или другого диэлектрического покрытия необязательно. Однако для улучшения изображения важно обеспечить плотное прилегание к контролируемой поверхности.

Приборы для магнитооптического контроля предлагаются американской фирмой PRI Research & Development Corporation. Прибор обеспечивает контроль на рабочих частотах от 1,5 до 200 кГц. В состав прибора входит головка сканирования, которая накладывается на контролируемую поверхность. Бездефектные заклепки создают изображения круговой формы. Все изображения, на которых нарушена округлая форма, означают трещину или коррозионное повреждение. На магнитооптической дефектограмме, приведенной на рис. 13, можно увидеть образы двух заклепок без дефектов и двух заклепок с трещинами. Изображения были получены на высоких рабочих частотах 50... 100 кГц. Изображения могут наблюдаться оператором на персональном устройстве наблюдения PVS (Personal Viewing System) или передаваться на дополнительный внешний монитор.

Вихретоковые магнитооптические системы МОИ уже нашли применение в практике, в частности в американских авиационных концернах Boeing и Lockheed Martin. В Варшавском институте авиационных войск (ITWL — Instytut Techniczny Wojsk Lotniczy) системы МОИ используются для продления ресурса истребителя Ми-14, бомбардировщика Су-22 и транспортного самолета Як-40. При этом отмечается уменьшение времени контроля больших поверхностей, возможность контроля через слой краски без необходимости ее удаления, возможность наблюдения изображения дефекта в реальном времени, простота интерпретации изображений. Но кроме многих позитивных качеств метод имеет и недостатки, в частности, при контроле выпуклых и вогнутых поверхностей. В этом случае из-за отдаления головки сканирования от поверх-

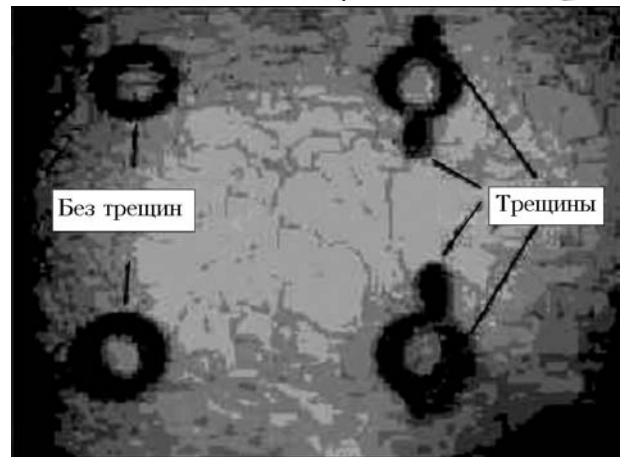


Рис. 13. Магнитооптические изображения заклепок без трещин (слева) и заклепок с трещинами (справа)

ности значительно уменьшается чувствительность, а также искажается часть изображения [35]. Кроме того, при выявлении трещин во внутренних слоях или под головкой заклепки магнитооптические системы не достигают уровней чувствительности, представленных выше вращательных систем вихретокового контроля.

Выводы

Рассмотрена проблема выявления дефектов в зоне заклепок многослойных авиационных конструкций вихретоковым методом и представлены различные подходы к ее решению.

Предложено классифицировать различные способы контроля зоны заклепок по способу сканирования контролируемой зоны вихретоковым преобразователем на статический, скользящий и вращательный способы.

Представлены вихретоковые способы контроля зоны заклепок с двумерной визуализацией результатов контроля и показаны их ограничения, в частности, при контроле поверхностей со сложной геометрией.

Проведен сопоставительный анализ достоинств и недостатков различных способов контроля зоны заклепок. Показано, что наибольшую чувствительность, глубину и селективность контроля имеют вращательные способы, в которых используется симметрия контролируемой зоны. Наибольшую производительность контроля имеют статический и скользящий способы. При реализации статического и скользящего способов имеет место большое влияние мешающих параметров, которые могут существенно ограничивать возможность контроля в сложных условиях.

Представлены новые ВТП для контроля зоны заклепок в статическом и вращательном режиме и результаты их исследования. Предложенные кольцевые ВТП для статического контроля имеют значительно меньшую (по сравнению со стандартными) высоту, что расширяет возможности контроля в труднодоступных местах. Разработанные ВТП мультидифференциального типа для контроля во вращательном режиме превосходят известные по чувствительности, селективности и глубине контроля.



1. Schmidt H.-J., Schmidt-Brandecker B., Tober G. Design of modern aircraft structure and the role of NDI // *Insight*. — 2000. — 42, № 3. — P. 141–147.
2. Jamet J. Non-destructive testing of aeronautical structures // *Ibid.* — 1996. — 38, 12. — P. 844–845.
3. Ball D. L. The Role of Nondestructive Testing in Aircraft Damage Tolerance // *Materials Evaluation*. — 2003. — № 7. — P. 814–818.
4. Учанин В. Н. Вихретоковый метод обнаружения скрытых дефектов усталостного и коррозионного происхождения. — Киев: О-во «Знання» УССР, 1988. — 20 с.
5. Тетерко А. Я., Учанин В. Н., Дорофеев А. Л. Контроль дефектов под обшивкой // Новые физические методы неразрушающего контроля качества продукции. — М.: МДНТП. — 1977. — С. 30–35.
6. Выявление дефектов в неразъемных конструкциях // Авиационные материалы. Дефектоскопия металлов / В. Н. Учанин, А. Л. Дорофеев, Ю. Г. Казаманов и др. — М.: ВИАМ, 1979. — Вып. 6. — С. 59–64.
7. Учанин В. Н., Цирг В. Н. Опыт применения низкочастотных вихретоковых дефектоскопов для выявления скрытых дефектов усталостного и коррозионного происхождения // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1989. — № 4. — С. 71–75.
8. Учанин В. Н., Цирг В. Н. Обнаружение скрытых коррозионных повреждений авиационных конструкций вихретоковым методом // Физ.-хим. механика материалов. — 1990. — № 4. — С. 103–104.
9. Учанин В. Н. Развитие вихретоковых методов обнаружения подповерхностных дефектов // Праці 3-ї Наук.-техн. конф. «Приладобудування 2004: стан і перспективи». — Київ: ПБФ НТТУ «КПІ», 2004. — С. 190–191.
10. Беда П. И., Санунов В. М. Опыт вихретокового контроля крепежных отверстий в конструкциях авиационной техники // Дефектоскопия. — 2000. — № 4. — С. 3–9.
11. *Nondestructive Testing Handbook*. Vol. 4: Electromagnetic Testing (Eddy current, flux leakage and Microwave Nondestructive Testing). Second edition. Edited by R. C. McMaster and P. McIntire. USA: American Society for NDT, 1986. — 677 p.
12. Mahi Uddin Khan. Monitoring of aircraft structure and engine components through eddy current testing during maintenance // Proc. of the joint EC-IAEA meeting «NDT methods for monitoring degradation». Petten (Netherlands). — 1999. — P. 196–205.
13. Hagmaier D. J. Eddy Current Standard Depth of Penetration // *Materials Evaluation*. — 1985. — № 10. — P. 1438–1441.
14. Mottl Z. The quantitative relations between true and standard depth of penetration for air-cored probe coils in eddy current testing // *NDT & International*. — 1990. — 23. — № 1. — P. 11–18.
15. Uchanin V. The investigation of low frequency eddy current probes with super high penetration (THP04). Abstracts of 16-th world conference on non-destructive Testing, Montreal, august 30–september 3, 2004. — P. 145.
16. Mook G., Bauke H., Uchanin V. Wirbelstromprüfung mit hohen Eindringtiefen — Theorie und Praxis. Abstracts of the DACH (DGZfP, ЦГfZP, SGZP) Jahrestagung Innsbruck, Mai 29–31, 2000 (см. также сайт: www.ndt.net. Интернет видання NDTnet. — Aug. 2000. — 5, №8).
17. Пат. № 2541772 (Франція). G 01 N 27/90. Procédé et dispositif pour l'examen non destructif de jonctions rivetées ou analogues au moyen d'une sonde à courants de Foucault / J.-L. Arnaud, M. Floret (Франція). — № 8303043, заявл. 24.02.1984. Опубл. 31.08.84. — 22 с.
18. Hagmaier D. J. Nondestructive testing developments in the aircraft industry // *Materials evaluation*. — 1991. — № 12. — P. 1470–1478.
19. Hagmaier D. J. Application of crack detection to aircraft structures // *Fatigue crack measurement: techniques and applications* / Editors K. J. Marsh, R. A. Smith, R. O. Ritchie. — Warley (UK): EMAS, 1991. — P. 419–455.
20. Uchanin V., Mook G., Stepinski T. The investigation of deep penetrating high resolution EC probes for subsurface flaw detection and sizing, 8-th Europ. Conf. for NDT, Barcelona. 2002 (див. також сайт: www.ndt.net. Интернет видання NDTnet. — February 2003. 8, № 2).
21. Uchanin V. New type multidifferential eddy current probes for surface and subsurface flaw detection // *Zeszyty problemowe Badania nieniszczace*. Warszawa. — 2001. — № 6. — С. 201–204 (см. также сайт: www.usndt.com.ua).
22. Учанин В. Н., Цирг В. Н. Выявление усталостных трещин под головкой заклепок вихретоковым методом // Тез. докл. X Всесоюз. науч.-техн. конф. «Неразрушающие физические методы и средства контроля» (г. Львов). — Кн. 2. — 1984. — С. 35.
23. Harrison D. The detection of cracks under installed fasteners by means of a scanning eddy current method. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. — Vol. 6A. — La Jolla: Edited by D.O. Thompson and D.E. Chimenti, Plenum Press. — 1987. — P. 1013–1017.
24. Пат. № 4496904 США, МКИ G 01N 27/72. Eddy current measurement apparatus for non-destructive testing in the vicinity of fastener / David J. Harrison (Англія). — № 336341; заявл. 19.05.81; опубл. 29.01.85; НКІ 324/227. — 9 с.
25. Пат. № 4379261 США, МКИ G 01N 27/90. Rotating magnetic field device for detecting cracks in metal / Kenneth M. Lakin (США). — № 185968, заявл. 10.09.80; опубл. 05.04.83; НКІ 324/240. — 8 с.
26. *CS-Pulsed Eddy Current Inspection for Cracks in Multi-Layered Joint Al-Alloy Aircraft Structures* // W. Bischoff, H.-A. Crostack, M. Maass, Th. Meier, G. Tober. *Internet Journal — NDTnet*. — 1998. — 3, № 9.
27. *Eddy Current Sensor Network for Aircraft Fatigue Monitoring* / N. Goldfine, V. Zilberstein, A. Washabaugh et al // *Materials evaluation*. — 2003. — № 4. — P. 852–859.
28. Lingvall F., Stepinski T. Automatic detection and classifying defects during eddy current inspection of riveted lap-joints // *NDT & International*. — 2000. — 33. — P. 47–55.
29. Учанин В. М., Карпаш М. О. Застосування нейронних мереж для ідентифікації та оцінки параметрів дефектів вихреструмним методом // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. — Вип. 7. — 2002. — С. 124–129.
30. Тетерко А. Я., Учанин В. М. Вихреструмна дефектоскопія зварних швів із застосуванням двовимірної візуалізації // Там же. — Київ-Львів. — 1999. — С. 68–69.
31. Мок Г., Учанин В. Візуалізація результатів неразрушаючого контролю вихретоковим методом // Там же. — Київ-Львів. — Вип. 5. — 2000. — С. 9–16.
32. *Subsurface imaging by deep penetrating eddy current tomography* / A. A. Vertiy, S. P. Gavrillov, V. N. Stepanyuk, V. N. Uchanin // Там же. — Вип. 9: Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів. Зб. наук. праць. — Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України. — 2004. — С. 123–127.
33. Simms S. MOI: Magneto-Optic/Eddy current Imaging // *Materials evaluation*. — 1993. — № 5. — P. 529–534.
34. *Magneto-Optic/Eddy Current Imaging of Aging Aircraft: A New NDI Technique* // G. L. Fitzpatrick, D. K. Thome, R. L. Skaugset, W. C. L. Shih, E. Y. C. Shih, *Materials Evaluation*. — 1993. — 51, № 12. — P. 1402–1407.
35. Klimaszewski S., Ziela M., Dragan K. Badanie wielowarstwowych polaczen nitowzch statkow powietrznych za pomoca systemu MOI. *Zeszyty problemowe Badania nieniszczace*. — Warszawa, 2003. — № 8. — S. 133–136.



АКУСТИКО-ЭМИССИОННОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МОСТОВ

П. М. КОВАЛЬ, В. Р. СКАЛЬСКИЙ, П. М. СТАШУК, Ю. Л. ЛОТОЦКИЙ, Р. М. ПЛАХТИЙ

Дано теоретическое обоснование методик акустико-эмиссионного обследования технического состояния мостов. Для оценки образования микротрещин в элементах мостовых конструкций применяли критериальный параметр K_{pj} , учитывающий скорость изменения плотности энергии сигналов акустической эмиссии. Экспериментально установлено активность источников акустической эмиссии при статической и динамической нагрузке мостов. На основе полученных данных осуществлен анализ кинетики излучения сигналов акустической эмиссии в мостах различного строения.

In the paper the theoretical grounds of acoustic emission inspection of the technical state of bridges is described. For the estimation of microcrack formation in the elements of bridge constructions the criterion parameter K_{pj} is applied, which takes into account the rate of energy density variation of acoustic emission signals. The activity of acoustic emission sources is experimentally established for static and dynamic loading of bridges. On the basis of the obtained data, the analysis of kinetics of acoustic emission signals radiation in the bridges of different structure is carried out.

Актуальность проблемы. Широкое применение в транспортном строительстве железобетонных конструкций (особенно для сооружения мостов) требует их надлежащего мониторинга методами неразрушающего контроля (НК) как в процессе строительства сооружений, так и во время эксплуатации. Например, детальный анализ случаев аварий железобетонных мостов показывает, что в процессе строительства основной их причиной является несоблюдение правил и технологии выполнения работ, а во время эксплуатации — растрескивание конструкций, в первую очередь под действием продуктов коррозии предвременно напряженной арматуры. Поэтому в последнее время наряду с традиционными методами НК железобетонных изделий все шире используется метод акустической эмиссии (АЭ). Такие АЭ исследования не теряют своей актуальности, о чем свидетельствуют публикации [1–9], поскольку АЭ-контроль мостовых конструкций благодаря высокой чувствительности метода позволяет выявлять зарождение и развитие разрушения на ранних его стадиях, докритический рост усталостных трещин даже в случае их распространения внутри материала без выхода на поверхность конструктивных элементов моста. Метод АЭ, что очень важно для инженерной практики, позволяет осуществлять мониторинг объекта контроля (ОК) дистанционно, в реальном масштабе времени, независимо от формы и размера ОК.

Состояние проблемы. Во время проведения НК средствами АЭ-контроля возникают определенные трудности. В частности, в работе [10] авторы показали, что во время эксплуатации моста под воздействием динамических нагрузок возникают фоновые помехи, которые вносят искажение в частотный спектр сигналов АЭ (САЭ). Там же изложены полученные аналитические зависимости, которые дают возможность получить формулу для расчета максимального размера зоны контроля моста

и методики выбора оптимальной рабочей полосы частот АЭ-аппаратуры, когда искажения спектра САЭ становятся минимальными. В работе приводятся результаты расчетов нормируемых спектров САЭ в трех характерных зонах металлического моста: 1 — с имеющейся усталостной трещиной; 2 — расшатанного клепаного соединения; 3 — неповрежденного элемента конструкции. Спектры отличаются между собой по уровню мощности и по форме, что может служить критериальными признаками распознавания повреждений в мостах. Именно применение спектрального анализа САЭ [11] считается надежным критерием выявления коррозионного растрескивания, контроля развития трещин. Здесь сообщается о методах обработки САЭ на основе применения быстрого преобразования Фурье, приводятся схемы построения автоматизированной системы АЭ-диагностики. Эффективность такого подхода подчеркивается результатами, полученными в работе [12], где осуществляли АЭ-контроль мостовых железобетонных конструкций. Результаты АЭ-обследования 36 железнодорожных мостов приведены также в работе [13], где обсуждаются некоторые подходы к совершенствованию процедуры АЭ-контроля и обработки полученных данных.

В работе [14] рассматривают результаты экспериментальных исследований с целью определения взаимосвязи между параметрами АЭ и образованием трещин в элементах железобетонных мостов под действием нагрузки и продуктов коррозии. Обсуждаются данные экспериментальных работ по проблеме определения уровня шумов и их влияния на результаты АЭ-информации при исследовании железобетонного моста в условиях интенсивного движения электротранспорта. Дается их классификация, рассматриваются физические процессы возникновения и методы выделения из них полезных САЭ. Экспериментальные исследования



проводились с помощью анализаторов АЭ типа АВН-1М и АВН-3.

С использованием передвижной многоканальной лаборатории АЭ-диагностики проведены обследования Крымского, Большого Каменного, Большого Устинского мостов, а также моста метрополитена в Лужниках [15]. Обследования проводили с целью оценки несущей способности конструкций и их долговечности, выявления потенциально опасных дефектов, равномерности распределения напряжений в несущих узлах и элементах, прогнозирования трещиностойкости материала, а также изучения влияния на динамику перераспределения нагрузок климатических и некоторых других факторов. Анализ динамики развития процессов генерации АЭ в реальном масштабе времени и корреляционный анализ распределения позволили в соответствии с разработанными критериями обнаружить зоны повышенной опасности, локализовать дефектные участки и оценить локальное напряженное состояние в несущих узлах.

В работе [4] проведен АЭ-мониторинг существующих мостов, а также стендовое испытание железобетонной балки пролетного строения в лаборатории. Были выбраны конструкции мостов различных типов: пролетные строения из обычного железобетона, предварительно напряженного железобетона, а также сталежелезобетонное пролетное строение. Мосты были полностью визуально обследованы и диагностировались 12-канальным АЭ-прибором фирмы PAC Mistras system. Для АЭ-мониторинга использовали два типа первичных пьезопреобразователей (ПАЭ) фирмы DECI с резонансными частотами 55 и 150 кГц. Цель исследований — обнаружить зоны расположения дефектов, их типы и состояние, а также сравнить АЭ-данные лабораторных и натурных испытаний. Анализ полученных результатов и периодическое повторение АЭ-мониторинга дает возможность определить динамику развития дефектов и оценить реальное состояние сооружения в текущий момент. Методом АЭ проведены исследования путепровода, пролетные строения которого смонтированы из предварительно напряженного железобетона [5].

Испытания проводили в два этапа: первый — во время обычного движения автотранспорта и второй — при статической нагрузке пролетного строения с фиксацией массы и расположения автомобилей. Во время испытания удалось определить месторасположение накопленных внутренних повреждений. Следует отметить, что наибольшая активность САЭ проявлялась в одной и той же зоне при нагружении в два этапа. Из бетона были взяты керны с поврежденной и нормальной зоны, проведены лабораторные испытания, которые подтвердили зарождение разрушения в активной зоне излучения САЭ. Авторами рекомендована уменьшить скорость движения на путепроводе, установить фиксированный интервал между автомобилями и провести ремонтные работы по усилению пролетного строения.

Мосты составляют незначительную часть общей длины путей сообщения, но их состояние в значительной степени влияет на эксплуатационные

качества дорог. Это обусловлено тем, что мосты являются концентраторами транспортных потоков и обеспечить надежную и долговечную их работу тяжелее, чем самих дорог, поскольку они являются более сложными инженерными сооружениями и испытывают действия более разнообразных нагрузок и влияний [16, 17]. Кроме действия транспортной нагрузки и собственной массы пролетных строений, мосты испытывают динамические нагрузки от ветрового влияния и от продольного действия во время торможения или ускорения транспортных средств и т. п. Опоры еще и дополнительно испытывают давления льда, ударов различных плавающих предметов, а в сейсмически опасных районах — действия землетрясений.

В Украине функционирует разветвленная сеть автомобильных и железнодорожных дорог. На них насчитывается 16300 автодорожных мостов общей длиной 358 км на государственных дорогах и дорогах местного назначения, 4082 коммунальных мостов общей протяженностью 184,8 км и 8050 железнодорожных мостов общей длиной 210,4 км. Много мостов Украины эксплуатируется с повреждениями и дефектами. По данным натурных обследований состояния мостов, проведенных различными организациями в 1980-х годах [18, 19], несущие конструкции имеют, в основном, такие дефекты: разрушения защитных покрытий и коррозия металла стальных мостов — 41 % обследованных мостов; скалывания, раковины и трещины в бетоне — 65 %; коррозия арматуры — 40 %; карбонизация защитного слоя бетона — 60 %. Фактический срок работы железобетонных конструкций мостов 25...30 лет, после чего необходимо проводить дорогие ремонтные работы [20]. Основными причинами повреждений являются отсутствие водоотлива или разрушение гидроизоляции, что приводит к замоканию пролетных строений и, как следствие, проходит интенсивная коррозия арматуры и бетона.

Конструкции мостов склонны к хрупкому разрушению, т. е. к разрушению через распространение дефектов типа трещин. Процесс разрушения в таких материалах не проходит мгновенно. Поэтому своевременное выявление таких дефектов и оценка стадий субкритического подрастания макротрещины является важной научно-технической задачей. Обнаружение значительной части дефектов в мостах затруднено в силу того, что их металлические элементы покрыты красками, в железобетонных конструкциях арматура находится в бетоне, а трещина зарождается и развивается часто внутри материала. Таким образом, проблема обеспечения надежной и долговечной эксплуатации мостов становится все более актуальной в силу того, что растет срок эксплуатации мостов, увеличивается масса и интенсивность движения транспортных средств и динамические влияния на мостовые конструкции, повышается агрессивность внешней среды. Растущая сложность обеспечения надежной и долговечной эксплуатации мостов требует принципиально новых подходов к их технической диагностике [1, 21].



Цель работы — провести АЭ-обследования мостов для определения срока их дальнейшей безаварийной эксплуатации.

Методологические подходы к проведению АЭ-обследований мостов. Для оценки образования микротрещин во время исследования мостовых конструкций методом АЭ использовали подход, предложенный в работе [22]. Он заключается в применении критериальной оценки K_{pj} , что базируется на учете скорости изменения плотности энергии САЭ, которые регистрируются

$$K_{pj} = \lg(E_j/\tau_j^2), \quad (1)$$

где E_j — энергия j -го САЭ; τ_j — его длительность.

Для проведения цифровой обработки САЭ выражение (1) записывали в виде:

$$K_{pj} = \lg[\sum_{i=1}^n (A_{ji})^2 / LE_j^2] + \lg(\Delta U^2 / \Delta t), \quad (2)$$

где t — часовой интервал дискретизации САЭ ($\Delta t = \text{const}$); A_{ji} — число разрядов аналого-цифрового преобразователя для i -го отсчета амплитуды j -го САЭ; n — количество отсчетов амплитуды для j -го САЭ; LE_j — длительность j -го САЭ ($LE_j = n$).

При заданной чувствительности АЭ-аппаратуры U и частоты дискретизации входного сигнала вторая составляющая выражения (2) становится константой B , т. е.

$$K_{pj} = \lg[\sum_{i=1}^n (A_{ji})^2 / LE_j^2] + B. \quad (3)$$

При всех схемах статических и динамических нагрузок САЭ фиксировали с несущих конструкций моста программно-техническим комплексом «АКЕМ», построенном на базе персонального компьютера с использованием технологии «PCLab-Card». Для определения динамических характеристик использовали прибор VIBROPORT 30, оснащенный персональным компьютером производства фирмы «SCHENCK» (ФРГ).

При установке ПАЭ на поверхности металла значения критерия выделения САЭ от трещин K_{pj} принимали равным 3, на бетоне — 6. Обнаруженные источники АЭ за описанной выше аналогией разделяли на четыре класса: I — пассивный источник, II — активный, III — критически активный, IV — катастрофически активный.

Кроме критерия K_{pj} вычисляли активность источников АЭ из выражения:

$$F = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^T \frac{N_{k+1}}{N_k}, \quad (4)$$

где

$$\frac{N_{k+1}}{N_k} = \begin{cases} 1 & \text{при } N_k = 0, N_{k+1} > 0, \\ 0 & \text{при } N_k > 0, N_{k+1} = 0, \end{cases} \quad (5)$$

$k = 1, 2, \dots, K$; N_k — число событий в k -м интервале оценки параметров САЭ; N_{k+i} — число событий

в $k+1$ -м интервале оценки параметров САЭ; k — номер интервала оценки параметров САЭ.

Оценку осуществляли в интервалах $F \ll 1$, $F = 1$, $F > 1$. Относительную мощность J_k источника АЭ на каждом интервале регистрации определяли по формуле

$$J_k = A_K / W \sum_{k=1}^K A_k. \quad (6)$$

Здесь A_k — средняя амплитуда источника на интервале k ; A_K — средняя амплитуда всех источников АЭ, зарегистрированных на ОК, за исключением анализируемого на интервале k ; W — коэффициент, определяемый из эксперимента.

Оценку класса источника также проводили за локально-динамическим критерием в реальном масштабе времени с использованием таких параметров САЭ: N_{i+1} — число выбросов АЭ в событии; N_i — число выбросов в предыдущем событии или E_{i+1} — энергия АЭ-события; E_i — энергия предыдущего АЭ-события. Для каждого события вычисляют величины $W_{i+1} = N_{i+1}/N_i$ или $W_{i+1} = E_{i+1}/E_i$ и получали значение

$$V_{i=1} = \left(1 + \frac{P_{i+1} - P_i}{P_{i+1}} \right)^4 - 1, \quad (7)$$

где P_{i+1} — величина внешнего параметра в момент регистрации события АЭ; P_i — значение внешнего параметра в момент регистрации предыдущего события (если в качестве параметра использовали время, тогда это промежуток времени от начала интервала наблюдения).

Оценку опасности процессов, проходящих в структуре материалов во время нагружения пролетного строения, осуществляли с помощью анализа кинетики развития САЭ с использованием общего анализа данных, полученных на этапах выдержки под нагрузкой. Анализ выполняли с формализацией данных и описанием полученной зависимости выражением:

$$\tilde{A} = a\tilde{P}^b \text{ при } t_i = \text{const}, \quad (8)$$

где $\tilde{A} = A_T/A_{\max}$, $\tilde{P} = P_T/P_{\max}$; A_T , A_{\max} , P_T , P_{\max} — текущие и максимальные значения параметров.

Абсолютное значение показателя степени $b < 3$ свидетельствует о том, что дефекты, развивающиеся в структуре материала, не являются опасными.

Результаты АЭ-контроля и их интерпретация. АЭ-обследование моста через реку Захидный Буг. Объектом исследования был автодорожный мост возле с. Ягодын Волынской области, построенный в 1953–1954 гг. из металлических конструкций разобранного моста построения 30-х годов XX ст. Мост разрезной трехпролетный, в сечении состоит из двух ферм по схеме 3×62 м. Габариты проезжей части $\Gamma - 7,0 + 2 \times 1,55$ м. Металлические фермы клепаные с параллельными поясами с проездом понизу и треугольной решеткой. Расстояние между осями ферм 8,65 м. Верхние и нижние пояса —

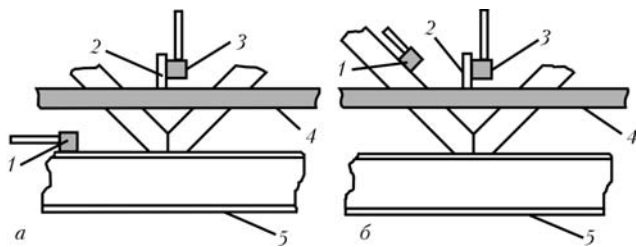


Рис. 1. Расположение ПАЭ во время нагружения пролета 0-1 (а) и пролетов 1-2 и 2-3 (б): 1 – ПАЭ № 1; 2 – волновод; 3 – ПАЭ № 2; 4 – железобетонная плита проезжей части; 5 – нижний пояс фермы

Н-образного сечения. Раскосы составные, двутаврового профиля, сквозные, решетчатые. Составные опорные стойки также коробчатого сечения. В плоскости верхних и нижних поясов расположены горизонтальные перекрестные связки. Плита проезжей части моста монолитная железобетонная, встроенная по металлическим профилям – «ветеренах», установлена на балочную клетку из поперечных составных балок переменного сечения, закрепленных к узлам ферм, и продольных балок двутаврового профиля, закрепленных к стойкам поперечных балок. Покрытие проезжей части моста асфальтобетонное, на тротуарах покрытие отсутствует. Опоры моста – массивные бетонные на железобетонных висячих сваях. Неподвижные опорные части – металлические с верхним и нижним балансирами и цилиндрическим шарниром между ними, подвижные – металлические катковые.

Пролетные строения моста подвергали статическим и динамическим нагрузкам. Для этого загружали поочередно все три пролета тягачами с прицепами массой от 20 до 38 т каждый. Статические нагрузки осуществляли последовательными заездами на проезжую часть каждой прогонки моста тягачей с прицепами. Масса грузовиков составляла 20...38 т. Максимальное количество их на проезжей части пролета – 8. После заезда и остановки каждого грузовика проводили регистрацию и обработку САЭ. Одновременно прогибомерами измеряли прогибы ферм в середине пролета, а электромеханическими тензодатчиками – относительные деформации наиболее напряженных элементов ферм.

АЭ-информацию регистрировали на протяжении 45...120 с. ПАЭ устанавливали в зоне максимальных растягивающих напряжений (средняя часть пролета, рис. 1). Пролеты моста нумеровали со стороны территории Украины. Перед установлением ПАЭ на несущую балку и ребро жесткости выполняли очистку последних от краски и ржи. Диаметр зачищенной зоны поверхности составлял примерно 20 мм. После нанесения акустопрозрачного контактного слоя ПАЭ прижимали к поверхности металла с помощью струбцин.

ПАЭ № 3 во время испытаний всех пролетов располагали на волноводе, непосредственно установленном в бетоне плиты проезжей части. Волновод изготавливали из арматурного стержня диаметром 8 мм и длиной 150 мм. На одном из краев волновода параллельно его оси делали лыску глубиной 3...4 мм, на которой располагали ПАЭ. Вол-

новод устанавливали в бетоне, где высверливали отверстие диаметром 7 мм, глубиной 10...15 мм и с натяжением фиксировали волновод с ПАЭ. Регистрацию и обработку САЭ осуществляли по двум каналам одновременно.

Применяли испытания двух видов. Первый заключался в проезде через каждый пролет моста одного тягача с прицепом фиксированной массы с постоянной скоростью, которую изменяли в диапазоне значений 5, 10, 20 и 40 км/ч. Регистрацию и обработку САЭ проводили начиная с момента заезда тягача с прицепом на пролет и заканчивали с выездом его с пролета моста. Второй вид динамических испытаний заключался в переезде тягача с прицепом фиксированной массы с постоянной скоростью через порог, установленный в центральной части пролета моста. Скорость движения была такой же, как и в первом варианте. В качестве порога использовали деревянный брус толщиной 10 см.

Обработку критериальной оценки выявления САЭ от трещин проводили по ее определению в соответствии с коэффициентом K_{pj} . Например, на первой, второй и третьей ступенях нагрузки пролета 0-1 соответственно одним, двумя и тремя грузовиками развитие трещин не фиксировали. САЭ от трещин зафиксированы только на четвертой ступени загрузки (4 грузовика). Анализ зарегистрированных параметров САЭ (амплитуда, энергия, длительность) показал, что они имеют низкие числовые значения, что свидетельствует о стабилизации развития микропроцессов в структуре материала.

Последующие испытания моста, проведенные с использованием метода АЭ, показали, что при эксплуатационных нагрузках в нем не возникают дефекты, развитие которых является опасным для конструкций пролетных строений [21].

АЭ-обследование автодорожного моста через р. Пивденный Буг [23]. Мост расположен возле с. Луполово автодороги Одесса–Киев. Пролетное строение моста – сталежелезобетонное, неразрезное, по схеме (32,9 + 43,3 + 43,3 + 32,9 м). В поперечном сечении оно состоит из шести главных металлических балок, объединенных монолитной железобетонной плитой проезжей части и связками. Габарит по ширине моста включает: трехметровую отдельную полосу, двухполосную проезжую часть шириной 7,5 м, полосы безопасности шириной 2 м и тротуар шириной 0,78 м. Полная ширина моста – 14,14 м, длина – 153,3 м, строительная высота по фасаду – 2,1 м. Промежуточные опоры – железобетонные стоечные.

Пролетное строение моста испытывали статической и динамической нагрузками. Как испытательную нагрузку использовали грузовые автомобили массой 25 т каждый. Целью исследования моста было выявление источников АЭ, которые свидетельствуют о дефектах, проявляющих критическую активность во время статической и динамической нагрузок мостовых конструкций, выявления закономерностей процесса излучения АЭ.

По первой схеме нагрузки был создан максимальный изгибный момент в пролете 3-4. ПАЭ

разместили на ребре крайней двутавровой металлической балки. Две следующие схемы предусматривали создание максимальных усилий в железобетонной консоли плиты проездной части, а ПАЭ устанавливали на бетон. Перед установлением ПАЭ на металле поверхность его очищали от краски. После нанесения слоя акустически прозрачного заполнителя «Рамзай» ПАЭ прижимали к поверхности с помощью струбцины. Прижимали ПАЭ к бетону с помощью магнита, что одним концом фиксировал ПАЭ, а другим прикреплялся к металлу верхней полки двутавровой балки (рис. 2).

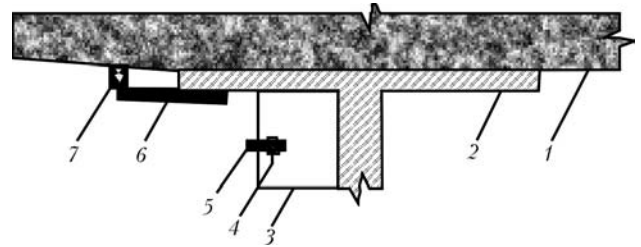


Рис. 2. Схемы расположения ПАЭ во время испытания моста: 1 — железобетонная плита проезжей части; 2 — металлическая балка; 3 — ребро жесткости металлической балки; 4 — ПАЭ размещен на металле; 5 — прижимающая струбцина; 6 — магнит; 7 — ПАЭ размещен на бетоне (схема № 2 и 3)

Регистрацию и анализ САЭ во время статических испытаний проводили с момента остановки автомобилей в местах, определенных схемами испытаний. Информация регистрировалась на протяжении 40...60 с, а во время динамических испытаний — от момента заезда автомобиля на мост и к моменту выезда с него. Расположение ПАЭ было аналогично расположению их во время статических испытаний.

Во время статических испытаний пролетного строения моста по схеме № 1 фиксировали САЭ от дефектов в материале металлической балки. На это указывают соответствующие значения параметра K_{pj} . Анализ опасности развития дефектов, появляющихся в структуре материалов при нагрузке пролета, показал следующее. Начиная с 12-й секунды проявляется зависимость между уровнем нагрузки и накопленной энергией САЭ. При этом значение коэффициентов в аппроксимирующем выражении равны: $a = 0,0878$; $b = -1,76897$; $\sigma^2 = 0,02824$. Абсолютное значение показателя степени $b < 3$, т. е. во время нагрузки пролетного строения моста по схеме загрузки № 1 развивающиеся дефекты в структуре материала не являются опасными.

При статических испытаниях пролетного строения моста по схемам № 2 и 3 фиксируются САЭ от микротрещинообразования в материале железобетонной плиты проезжей части. На это указывают соответствующие значения параметра K_{pZ} , что не превышают значения шесть. Анализ опасности развития этих дефектов показал следующее. Согласно схеме загрузки № 2, начиная с 20-й секунды, существует зависимость между накопленной энергией САЭ и нагрузкой на пролет. Анализ полученной зависимости с формализацией данных показывает, что она описывается выражением с параметрами аппроксимации: $a = 0,26273$; $b = 0,05307$; $\sigma^2 = 0,36816$. По схеме загрузки № 3 зависимость между накопленной энергией САЭ и нагрузкой на пролет появляется после 7 с. После 11 с: $a = 1,08086$; $b = 1,61458$; $\sigma^2 = 0,04489$. Абсолютное значение показателя степени $b < 3$, т. е. во время испытаний пролетного строения моста по схемам загрузки № 2 и 3, дефекты, которые развиваются в структуре материала, не являются опасными.

Таким образом, при испытании моста с использованием метода АЭ, установлено, что мост не имеет дефектов структуры материалов, которые препятствовали бы надежной и безопасной эксплуатации конструкций пролетных строений и име-

ли бы тенденцию к развитию. Для оценки состояния конструкций пролетного строения моста и для создания системы его мониторинга целесообразно через некоторое время проводить аналогичные испытания. Это позволило бы сформировать базу данных для установления зависимости с целью оценки долговечности моста за параметрами САЭ.

АЭ-обследование моста через реку Прут в г. Черновцы. Мост расположен на магистральной автомобильной дороге третьей технической категории М20 Житомир–Черновцы–Тереблече [24]. Он металлический, шестипролетный и построенный по схеме: $38,60 + (39,14 + 2538,90 + 39,14) + 38,60$. Общая длина моста составляет 247,18 м.

Мостовой переход с металлическими пролетными строениями на бутобетонных опорах построен в 1927–1931 гг. и пересекает р. Прут под прямым углом. Дважды во время Второй мировой войны мост был разрушен и дважды был восстановлен. Фундамент второй опоры не был разрушен и на нем построена бутобетонная опора в первичном виде на высоту 5,0 м. Выше устроена временная рама, замурованная основанием в бутобетон опоры; на металлическую раму через шпальные клетки были оперты фермы. В 1961 г. деревянная проезжая часть моста была заменена на железобетонную.

Пролетные строения состоят из двух сквозных металлических ферм с параллельными поясами и проезжей частью понизу. Фермы открытые и не имеют ветровых связей верхнего пояса. Заполнение выполнено в виде треугольной решетки с дополнительными стойками.

Береговые пролеты 0-1 и 5-6 перекрыты разрезными фермами. Русловые пролеты 1-2...4-5 перекрыты неразрезной четырехпролетной фермой. В каждом пролете фермы разбиты на 10 панелей длиной 3,8...3,87 м. В поперечном разрезе расстояние между фермами в осях составляет 6,51 м, а их расчетная высота — 4,04 м.

Сечения элементов ферм выполнены с прокатных швеллеров и уголков, усиленных в верхнем и нижнем поясах металлическими листами в средних панелях и опорных зонах неразрезных ферм. В поперечном направлении жесткость пролетных строений обеспечивают горизонтальные диагональные вязи из двойных прокатных уголков размером 90×90×10 мм, расположенных в нижнем поясе.

Береговые опоры — бутобетонные, монолитные с обратными стенками. Стойки состоят из двух



частей, каждая из которых заканчивается карнизом. Нижняя часть утолщенная и имеет высоту около 5,0 м, верхняя — около 1,5 м. Железобетонная обратная стенка выполнена в монолите с тротуарными консолями на длину примерно 7,0 м. Снизу тротуарных консолей с верхней и нижней сторон устроены две бетонные диафрагмы.

Промежуточные опоры бутобетонные, пустотелые, оштукатурены с расшивкой швов и выполнены, как и стояки, с двух частей. Боковые грани нижних частей промежуточных опор имеют наклоны с соотношением 15:1. Верхняя сторона выполнена в виде удлиненного эллипса и выполняет функцию ледореза, низовая часть — полукруглая. По данным опроса старожилов установлено, что фундаменты всех опор — кессоны с закладкой на глубину 20,35 м. Фермы установлены на подвижные опорные части (катковые, валковые) и неподвижного типа (балансирные).

Железобетонная плита проезжей части является сборной конструкцией и имеет толщину 11 см. В поперечном сечении она выполнена в форме корыта, состоящего из двух Г-образных блоков. Продольный шов расположен по оси проезжей части. Длина блока равна длине панели, поперечные швы расположены над поперечными балками. Плита уложена на балочную клетку, состоящую из продольных и поперечных балок.

Поперечные балки составные, клепаные с уголков и листов двутавра высотой 0,74 м, расчетной длиной 6,15 м, установленные в каждом узле нижнего пояса. Они жестко связаны со стойкой главных ферм, образуя полураму. К вертикальным ребрам для обеспечения местной стойкости с двух сторон приклепаны ребра жесткости с уголков 90×90×10 мм.

Продольные балки выполнены с двутавра № 30 и жестко связаны в одном уровне (с помощью опорного столика) с поперечными балками. В поперечном сечении установлено шесть продольных балок с расстоянием в осях 1,0 м и расчетной длиной 3,7... 3,75 м. Опирается плита на балочную клетку с помощью железобетонных брусьев сечением 13,5×12,5 см, омоноличенных с верхним поясом продольной балки. Длина брусьев равняется длине панели.

Во время статических испытаний моста были реализованы 13 схем загрузки поочередно всех пролетов. В качестве испытательной нагрузки использовали загруженные балластом два самосвала автомобилями «КрАЗ» массой по 27 т каждый. Делали замеры: прогибов (вертикальных перемещений) — в середине пролетов 0-1, 1-2 и 5-6 барабанно-шестеренчатыми прогибомерами с проволоочной связью системы Аистова ПАО-6; напряжений (относительных деформаций) — в середине пролетов 0-1, 1-2, 5-6 в верхних и нижних полках главных балок электромеханическими тензотрами и микроиндикаторами с базой 200 мм.

Динамические нагрузки на мост создавали проездом загруженных балластом самосвалов марки «КрАЗ» с разными скоростями по проезжей части моста и с проездом через порожек — деревянный брус сечением 10×10 см, который лежал непод-

вижно поперек пролета на его середине. Были реализованы такие нагрузки: проезды одного автомобиля «КрАЗ» со скоростями 10, 20, 30 км/ч в направлении от опоры 6; проезд одного автомобиля «КрАЗ» через порожек 10×10 см со скоростью 20 км/ч.

Вибропреобразователь закрепляли к верхнему поясу фермы посередине пролета, который исследовался (0-1, 1-2 и 5-6) [24].

Регистрацию и анализ САЭ во время статических испытаний проводили с момента остановки автомобилей в местах, определенных схемами испытаний. Информацию регистрировали в течение 40... 60 с. Также проводили обработку критериальной оценки выявления САЭ от трещин, как и в упомянутых выше исследованиях, по коэффициенту K_p .

В результате статических и динамических испытаний моста через р. Прут на автодороге Житомир—Черновцы установлено, что конструкции моста не имеют дефектов и повреждений, которые снижали бы несущую способность. Испытания моста показали, что конструкции усиления элементов нижнего пояса в пролетах 1-2, 2-3 и 5-6 включены в работу. Для обеспечения долговечности моста необходимо завершить работы по защите его металлических конструкций от коррозии с использованием современных технологий и материалов, а также выполнить работы по ремонту опор моста, устроив защитные железобетонные рубашки. Рекомендовано установить ограничение грузоподъемности с пропуском временной нагрузки максимальной общей массой до 30 т на одном пролете.

Выводы

Проведение АЭ-обследований таких технически сложных сооружений, как мосты требует тщательной подготовки, которая заключается в расчете режимов работы сооружения, разработке методологических оснований проведения НК, научно-обоснованной интерпретации полученных данных и т. п.

Метод АЭ позволяет получить необходимые диагностические данные для оценки технического состояния мостовых сооружений. Особенно эффективно использовать АЭ-данные для выявления зарождения и развития макротрещин.

По результатам периодических АЭ-обследований моста можно оценить остаточный ресурс сооружения.

1. Скальський В. Р., Коваль П. М. Акустична емісія під час руйнування матеріалів виробів і конструкцій. Методологічні аспекти відбору та обробки інформації. — Львів: Сполом, 2005. — 396 с.
2. Скальський В. Р., Демчина Б. Г., Карпунін І. І. Руйнування бетонів і акустична емісія (Огляд). Повідомлення 2. Корозія залізобетону. Апаратурні засоби. АЕ-контроль та діагностика будівельних споруд // Техн. діагностика й неабрушу. контроль. — 2000. — № 2. — С. 9–27.
3. Акустико-емісійна діагностика мостових і будівельних конструкцій / А. И. Манохин, Б. А. Лифшиц, Л. И. Маслов и др. // Сб. докл. I Всесоюз. конф. «Акустическая эмиссия материалов и конструкций». — Ростов-на-Дону: Изд-во Ростов. ун-та, 1989. — Ч. 11. — С. 8–13.
4. Golaski L., Gebski P., Ono K. Diagnostics of reinforced concrete bridges by acoustic emission // J. of Acoustic Emission. — 2002. — 20. — P. 83–98.



5. *Swit G.* Diagnostics of a viaduct built of prestressed concrete beams by acoustic emission // Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій // Під заг. ред. В. В. Панасюка. — Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2004. — С. 847–854.
6. *Fatigue testing of specimens from the Mason Creek Bridge / DNL Infrastructure Technologies Inc. // A Preliminary Summary Report. — 1998. — 7 p.*
7. *Schechinger B. Vogel T.* A deeper understanding of acoustic emission wave propagation in reinforced concrete // Proc. International symposium: Non-destructive testing in civil engineering, Berlin, September 16–19, 2003. — Berlin, 2003. — 6 p.
8. *Holford K. M., Pullin R., Lark R. J.* Acoustic emission monitoring of concrete hinge joint models // Proc. 26th European conference on acoustic emission testing, Berlin, September 15–17, 2004. — Berlin, 2004. — P. 211–218.
9. *Damage assessment in railway sub-structures deteriorated using AE technique / Tomoki Shiotani, Yasuhiro Nakanishi, Xiu Lou and Hiroshi Naya // Ibid. — P. 225–232.*
10. *Ону М.* Акустико-емісійний контроль бетонних конструкцій // Конкуріто когаку. — 1988. — 25. — № 12. — С. 5–11.
11. *Акустико-эмиссионное обследование железнодорожных мостов / А. П. Брагинский, Д. Г. Евсеев, Б. М. Медведев, Б. Г. Иванов / Сб. тез. докл. I Всесоюз. конф. «Акустическая эмиссия материалов и конструкций», Ростов-на-Дону, 11–13 сент. 1984 г. — Ч. 1. — С. 28–29.*
12. *Акустико-емісійний контроль мостових залізобетонних конструкцій / Т. Сакуда, Я. Гаші, К. Маеда, Я. Канікава // Хіхакай кенса. — 1988. — 37, № 9. — С. 965–866.*
13. *Gong Z., Nybor E. G., Oommen G.* Acoustic emission monitoring of steel railroad bridges // Mater. Eval. — 1992. — 50, № 7. — P. 883–887.
14. *Муравин Г.Б., Ерминсон А. Л.* Использование акустической эмиссии для контроля состояния железобетонных мостов // Сб. докл. I Всесоюз. конф. «Акустическая эмиссия материалов и конструкций». — Ростов-на-Дону: Изд-во Ростов. ун-та, 1989. — Ч. 11. — С. 3–8.
15. *Использование метода акустической эмиссии для экспресс-контроля разрушения бетонов с добавками пластификаторов / Н. Г. Чаусов, С. А. Недосека, И. О. Богинич, Н. Д. Гах // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1998. — № 3. — С. 12–16.*
16. *Лантух-Лященко А. Г.* Проблема створення національної системи експлуатації мостів // 36. доп. Укр. міжгалуз. наук.-практ. сем. «Сучасні проблеми проектування, будівництва та експлуатації споруд на шляхах сполучення». — Київ, 1998. — С. 138–145.
17. *Бондарь Н. Г.* Как работают мосты. — Киев: Наук. думка, 1986. — 120 с.
18. *Виноградский Д. Ю., Руденко Ю. Д., Шкуратовский А. А.* Эксплуатация и долговечность мостов. — Киев: Будівельник, 1985. — 104 с.
19. *Страхов Н. С.* Эксплуатация та реконструкция мостів: Навч. посібник. — Киев: НМК ВО, 1992. — 88 с.
20. *Васильев А. И., Польвеко В. П.* Долговечность железобетонных мостов и меры по увеличению срока их службы // Автомобильные дороги. — 1995. — № 9. — С. 30–32.
21. *Коваль П. М.* Використання методу акустичної емісії при дослідженні мостів // Автошляховик України. — 2003. — № 1. — С. 34–37.
22. *Филоненко С. Ф.* Акустическая эмиссия. Измерения, контроль, диагностика. — Киев: КНУЦА, 1999. — 304 с.
23. *Коваль П. М., Сташук П. М., Фаль А. Є.* Дослідження прогнаної будови нового сталезалізобетонного автодорожного моста з використанням методу акустичної емісії // 36. наук. праць ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАНУ «Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій». — 2003. — Вип. 5. — С. 85–93.
24. *Виведення з аварійного стану металевого моста через р. Прут в м. Чернівці / П. М. Коваль, А. Г. Походенко, И. И. Лучко, П. М. Харлашко // Там же. — С. 72–84.*

Гос. дор. науч.-исслед. ин-т им. Шульгина, Киев
Физ.-мех. ин-т им Г. В. Карпенко НАН Украины, Львов

Поступила в редакцию
22.07.2005



Украинский информационный Центр «НАУКА. ТЕХНИКА. ТЕХНОЛОГИЯ»

02094, г. Киев, ул. Минина, 3, к. 47

☎: 02094, г. Киев, а/я 41

Тел./факс: +38 (044) 573 30 40 с 8.00 до 14.00, моб.067 708 93 95

E-mail: office@conference.kiev.ua, www.conference.kiev.ua

Уважаемые коллеги!

Приглашаем Вас принять участие в работе ежегодных научно-практических конференций, семинаров, круглых столов, выставок, организуемых Украинским информационным Центром «НАУКА. ТЕХНИКА. ТЕХНОЛОГИЯ».

Четырнадцатая ежегодная международная конференция и выставка «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики»

16–20 октября 2006 г.

г. Ялта

Тематика конференции:

- Общие вопросы неразрушающего контроля (НК) и технической диагностики (ТД)
- Теоретические вопросы взаимодействия физических полей с веществом контролируемых объектов
- Техническая диагностика и мониторинг состояния производственных объектов
- Контроль напряженного состояния конструкций, изделий и сварных соединений
- Опыт и перспективы НК на предприятиях горно-металлургического комплекса
- НК и ТД в нефтегазовой отрасли
- Контроль строительных конструкций
- Вибрационные методы диагностики
- Вопросы обучения, подготовки, аттестации и сертификации специалистов, разделений НК и ТД
- Разработка и гармонизация стандартов в области НК и ТД
- Метрологическое обеспечение средств НК
- Состояние и развитие НК и ТД в Украине
- Заседание Правления УО НКТД



МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ

Г. В. МИКИТИН, Б. П. КЛИМ, Е. П. ПОЧАПСКИЙ, З. В. ДМИТРИВ

Предложен метрологический подход к использованию метода АЭ в неразрушающем контроле материалов и конструкций, объединяющий объект исследования, первичные измерительные преобразователи (акустические, тензометрические); методологию локации источника сигнала АЭ; систему отбора и обработки информации согласно адекватной физической модели сигнала АЭ; метрологическое обеспечение; интерпретацию результатов акустико-эмиссионного контроля согласно принятой адекватной модели трещины и взаимосвязи измеряемых параметров сигнала АЭ с характеристиками трещины.

Offered metrological approach to the use of the acoustic emission method in the nondestructive testing of materials and constructions. It takes into consideration: object of investigation, initial measuring transformers (acoustic, tensometric), methodology of an acoustic emission source location, system of information extraction and processing based on an adequate physical signal model, metrological securing, interpretation of an acoustic emission control results based on an adequate crack model, correlation of measured acoustic signal parameters with crack characters.

Сегодня научно-исследовательская работа национальных метрологических и прикладных институтов стран-участниц КООМЕТ и ЕВРОМЕТ актуализируется в одном из проблемных направлений метрологии — метрологическом обеспечении акустико-эмиссионных измерений в области неразрушающего контроля (НК) материалов и конструкций [1]. В проблеме акустико-эмиссионных измерений на сегодня решаются такие задачи: методы и средства воспроизведения образцового сигнала АЭ эмиссии (САЭ); современные метрологические требования к методологии акустико-эмиссионных измерений; новые подходы, технологии, методы и средства акустико-эмиссионных измерений; интерпретации результатов измерений параметров САЭ в связи с параметрами физической модели разрушения объекта исследования; внедрение методов оценки неопределенности измерений.

Однако решение указанных задач метрологического обеспечения акустико-эмиссионных измерений каждой в отдельности или в совокупности требует системного метрологического подхода к применению метода АЭ, включающего такие функционально взаимосвязанные элементы: объект исследования и его адекватную модель; методологию локации сигнала АЭ; методологию измерения параметров САЭ; акустико-эмиссионную измерительную систему с заданными метрологическими и техническими характеристиками; образцовый (стохастический) сигнал АЭ и его воспроизведение; стандартизированная методика НК материалов; подход к интерпретации результатов контроля на основании взаимосвязи параметров САЭ и параметров разрушения, установленной в процессе экспериментальных исследований.

В данной работе предложен метрологический подход к применению метода АЭ для НК материалов и конструкций.

Метрологический подход к применению метода АЭ для НК материалов и конструкций. Основными метрологическими критериями, обеспечивающими точность НК (пассивный, активный) конструкционных материалов методом АЭ являются обоснованный по метрологическим характеристикам выбор первичных измерительных преобразователей (преобразователей АЭ (ПАЭ), тензометрических преобразователей (ТП)); обоснование выбора стандартизированной методологии локации — приема и предварительной обработки определенным способом сигнала АЭ эмиссии первичными преобразователями с целью их дальнейшей локализации; применение стандартизированных универсальных аналоговых входных усилителей; управляемых полосовых фильтров; аналого-цифровых преобразователей (АЦП) сигнала АЭ адекватно физической модели сигнала; разработка и применение универсальных алгоритмов, программ анализа и цифровой обработки сигнала; разработка методологии измерения параметров САЭ на основании принципа, метода, методики измерения согласно действующих государственных нормативных документов; разработка структуры метрологического обеспечения измерения (контроля) параметров САЭ; анализ связи стандартизированных параметров САЭ с определенными параметрами трещины адекватно модели трещины (линейная, нелинейная механика разрушения) исследуемого материала.

Достоверность НК конструкционных материалов методом АЭ обусловлена информационными аспектами: наличием (отсутствием) дефектов; локализацией; площадью; условными размерами; формой; ориентацией; количеством; взаимным пространственным расположением; физическими характеристиками неоднородностей; интегральными значениями физико-механических характеристик



материала; пространственным распределением характеристик материала.

Единство и точность измерений параметров САЭ обусловлена метрологическими аспектами, в частности наличием метрологического обеспечения метода НК [2, 3]. С целью создания метрологического обеспечения НК материалов и конструкций методом АЭ предлагается метрологический подход к применению метода, учитывающий функционально взаимосвязанные элементы: объект исследования, первичные измерительные преобразователи, локацию 1; акустико-эмиссионную измерительную информационную систему 2; методологию измерения параметров сигнала АЭ 3; метрологическое обеспечение 4; интерпретацию результатов измерения 5 (рис. 1).

Такой метрологический подход позволяет обеспечить точность отбора и обработки САЭ, обусловленной амплитудно-частотной характеристикой измерительных каналов системы; типом и метрологическими характеристиками пьезоэлектрического и тензометрического преобразователей, их калибровкой; коэффициентом преобразования, усиления, фильтрации измерительных каналов; порогом дискриминации; методологию локации (линейной, плоской, на цилиндрических и сферических поверхностях) относительно задачи создания АЭ измерительных информационных систем; методологию измерения параметров САЭ согласно концепции метрологического обеспечения; интерпретацию результатов НК согласно выбранной модели трещины.

В структуру метрологического обеспечения измерения [4] входит применение прецизионных первичных измерительных преобразователей. Достоверная информация о процессах разрушения материала заложена в параметрах САЭ, форме сигнала, частотных характеристиках АЭ системы «объект исследования–первичный измерительный преобразователь» (акустико-эмиссионный для акустического канала системы, тензометрический

— для каналов раскрытия трещины и нагрузки). Точность регистрации амплитудного и частотного спектра САЭ обусловлена методологией и соответственно погрешностью локации источника АЭ; метрологическими характеристиками преобразователя; его калибровкой, причинами, ограничивающими частотный диапазон регистрируемого сигнала.

Среди большой разновидности преобразователей АЭ пьезоэлектрические (резонансные, полосовые, полосовые продольных волн, резонансные теплостойкие, полосовые теплостойкие, резонансные герметические, полосовые герметические, широкополосные; резонансные сдвига) имеют высокую степень помехоустойчивости, вибростойкости, высокую стабильность параметров при условии влияния повышенной температуры и радиации. Согласно техническим характеристикам разработанной шестиканальной АЭ информационно-измерительной системы (ИИС) адекватно модели САЭ выбран полосовой ПАЭ – П1ЭКМ 015-06. Частотный диапазон такого ПАЭ в пределах значений от 0,15 до 0,6 МГц, среднее значение чувствительности не меньше $2,2 \cdot 10^{11}$ В/м.

Для измерения относительной деформации $\Delta l/l$ и внутреннего напряжения в пределах постоянного значения модуля упругости E материала используют тензорезистивные преобразователи. С деформацией (например, под нагрузкой) исследуемого объекта деформируется проволоочная решетка, соответственно меняется сопротивление преобразователя вследствие тензоэффекта. Входной величиной преобразователя является деформация, выходной — изменение сопротивления. Уравнение преобразования тензорезистора соответственно запишется через коэффициент тензочувствительности k , механическое напряжение, модуль упругости E исследуемого материала [5]

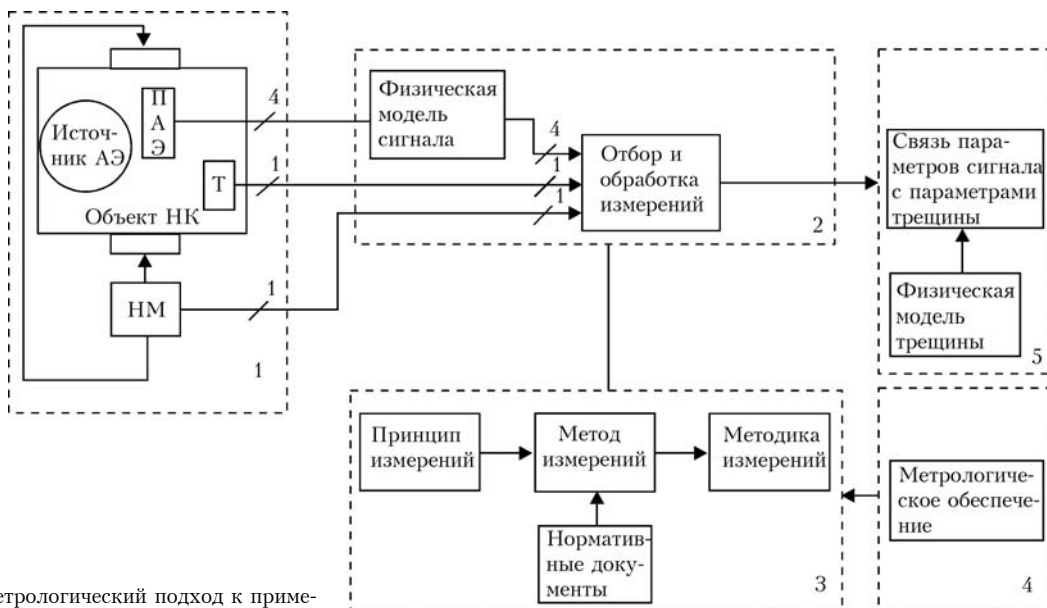


Рис. 1. Метрологический подход к применению метода АЭ для НК

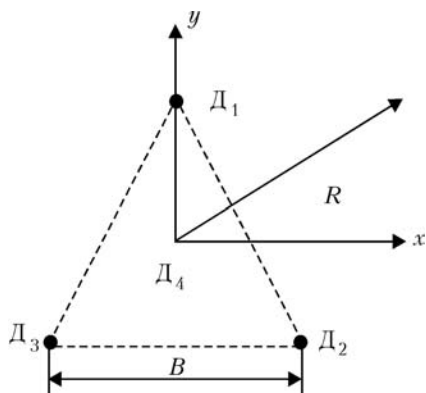


Рис. 2. Четырехточечная антенна для определения координат источников АЭ

$$\Delta R/R = (k/E)\sigma, \quad k = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l}, \quad \sigma = E(\Delta l/l),$$

где $\Delta R/R$ — относительное изменение сопротивления преобразователя; $\Delta l/l$ — относительная деформация проволоки.

Для металлов значение относительной деформации $\Delta l/l$ в пределах значения коэффициента $k = 0,5 \dots 4$ обуславливает относительное изменение сопротивления преобразователя $\Delta R/R = (1,25 \dots 10) \cdot 10^{-3}$.

Преимущественно используются электрические цепи с дифференциальным включением тензометрических преобразователей, в которых один тензорезистор R_1 испытывает деформацию растяжения в диапазоне $(R \dots R + \Delta R)$, а второй R_2 — деформацию сжатия в диапазоне $(R \dots R - \Delta R)$. Падение напряжения ΔU , полученное при разомкнутой диагонали моста определяется по формуле [5]:

$$\Delta U = \Delta R U (R_1 + R_2), \quad \Delta R / (R_1 + R_2) = k(\Delta l/l) \approx 2\Delta l/l,$$

где U — напряжение питания моста; $k = 2$ — коэффициент тензочувствительности металлов.

Для равноплечего моста падение напряжения определяется так:

$$\Delta U = \Delta I U / I \text{ или } \Delta U = \sigma U / E.$$

Методологические аспекты локации источника АЭ. Технология АЭ контроля (диагностирования) согласно [6], кроме АЭ аппаратуры обязательно

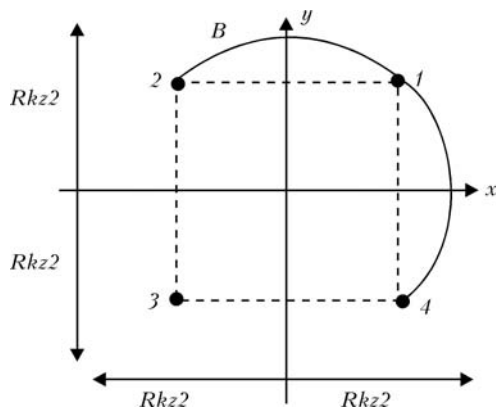


Рис. 3. Определение координат источников АЭ по четырехточечной схеме приема САЭ

должна содержать развернутую схему (карту) расположения первичных преобразователей АЭ, являющейся основой определенного типа локации. В литературе [7–10] приведены различные подходы к определению значения разницы времени прихода (РВП) сигналов АЭ по N-точечным схемам принятия сигнала. В [6] приведены наиболее распространенные варианты расположения ПАЭ в АЭ антеннах. Для определения координат источников АЭ различают: зонную, линейную, плоскую локации.

Для функционирования АЭ системы используется методология локации плоского типа по схеме: четыре ПАЭ расположены в вершинах и в центре равностороннего треугольника (датчики Д1–Д4) (рис. 2) [7]. Преимуществами используемой четырехточечной схемы локации источников АЭ на плоскости являются:

- наличие трех независимых значений РВП, позволяющих по алгоритму однозначно определять координаты источника по сравнению с трехточечной схемой размещения ПАЭ, принятой минимально количественной для определения координат источника АЭ на поверхности материала, конструкции;

- уменьшение вероятности регистрации мнимого события АЭ при воздействии помех, соответственно повышение помехоустойчивости;

- гибкость расположения ПАЭ при техническом диагностировании поверхности материалов, конструкции сложной конфигурации.

На практике для определения координат источников АЭ на объектах контроля плоского типа четыре ПАЭ располагают в вершинах квадрата на плоскости (рис. 3) [6]. Базой антенны B является расстояние между двумя «соседними» ПАЭ (точки 1, 2 или 1, 4). Координаты источников АЭ определяют в пределах зоны контроля, т. е. в пределах участка, который задают значениями $Rkz1, Rkz2$. Алгоритм и погрешность вычисления координат источника САЭ для четырехточечной схемы приема сигнала приведен согласно структуре блока локации в измерительной информационной системе отбора информации, представленной сигналами АЭ. Точность вычисления координат источника АЭ определяется погрешностью измерения разности времени прихода сигнала на ПАЭ и размещением элементов приемной антенны [6]. В работе [7] приведена методология оценки погрешности определения координат в случае использования четырехэлементной антенны.

Плоскую локацию (четыре ПАЭ) используют для определения координат источников АЭ на цилиндрических и сферических поверхностях [6]. Локацию на цилиндрической поверхности проводят с учетом развертки цилиндра, используя линейно-плоскостные комбинации (например, шесть ПАЭ, расположенных в вершинах трех квадратов, имеющих общие стороны). Для сферических поверхностей, имеющих большие радиусы кривизны, условно принятых за плоские, используют алгоритмы определения координат по схеме четырех ПАЭ, расположенных в вершинах квадрата, на плоскости.



В работе [13] предложен способ определения координат АЭ источника с помощью пространственной локации. Для реализации этого способа на сферической поверхности объекта располагают шесть ПАЭ. Три группы ПАЭ — по два в каждой размещают на поверхности объекта на трех взаимно перпендикулярных осях, пересекающихся в центре сферического объекта, по два ПАЭ на каждой оси, т. е. каждая группа ПАЭ контролирует соответствующую ось координат x , y , z , причем ПАЭ равноудалены один от другого (рис. 4) [13].

Для каждой группы ПАЭ определяют разницу времени прихода на соответствующие ПАЭ. Используя разницу времени прихода сигналов на ПАЭ и скорость волны в материале объекта, определяют координаты источника АЭ. Для такой пространственной локации на практике использованы три модифицированные двухканальные АЭ регистратор (типа АФ-15) с персональным компьютером, обрабатывающие зарегистрированную информацию. При условии, что координаты ПАЭ известны, каждый из приборов АФ-15 регистрирует разницу времени прихода τ_1 , τ_2 сигналов на свою пару ПАЭ. Эти значения РВП дают информацию о разнице расстояний от источника сигналов АЭ к соответствующим ПАЭ.

Методология локации (плоской, пространственной) источника АЭ основывается на применении принципа, метода и методики локации. *Принцип локации* — физическое явление приема и способ обработки сигналов АЭ преобразователями с целью их дальнейшей локализации.

Локализация источника АЭ — определение местонахождения источника АЭ по совокупности зарегистрированных сигналов АЭ [6].

Метод локации основывается на алгоритме функционирования блока локации в АЭ ИИС и, соответственно, созданного алгоритмического и программного обеспечения системы. Методика локации основывается на применении процедур выбора количества ПАЭ и схемы их размещения на исследуемом объекте (материале, конструкции); разработке алгоритма определения координат источника АЭ с соответствующей точностью по уже выбранной схеме размещения ПАЭ.

Методология измерения параметров сигнала АЭ и метрологическое обеспечение. Принцип, метод и методика измерения физической величины является основой методологии измерения параметров сигналов [14]. Взаимосвязь элементов методологии измерения параметров сигнала АЭ: объект исследования; принцип измерения; метод измерения; методика измерения; методология измерения; измерительная информационная система, нормативные документы. Основными аспектами методологии измерения параметров сигнала АЭ являются:

изучение физических свойств объекта исследования и физической природы возникновения АЭ; разработка адекватной модели сигнала АЭ; анализ параметров сигнала АЭ; выбор метода регистрации (измерения) параметров САЭ, адекватной модели сигнала, алгоритма регистрации; разработка (выбор) средства регистрации сигнала АЭ ИИС с целью измерения параметров сигнала АЭ, обра-

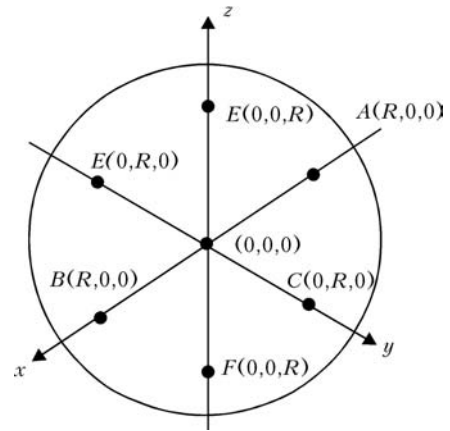


Рис. 4. Структурная схема пространственной локации источников АЭ

ботка и интерпретация результатов; выбор метода, алгоритма измерения параметров сигналов АЭ; разработка алгоритма проведения натуральных испытаний (растяжение и сжатие исследуемого образца) с целью установления связи параметров АЭ с параметрами разрушения материала; разработка метрологических основ применения метода АЭ и подхода к метрологическому обеспечению АЭ ИИС.

На основании структуры единой методологии измерения (контроля, диагностирования, прогнозирования, распознавания параметров объекта), анализа особенностей процесса АЭ измерения приведена структура методологии измерения параметров сигнала АЭ: объект исследования 1; источник АЭ 2; пьезоэлектрический преобразователь 3; модель сигнала 4; метод измерения 5; методика измерения 6; модель акустического измерительного канала ИИС 7; модель погрешности измерительного канала системы 8; методика оценивания метрологических характеристик измерительного канала 9; метрологическое обеспечение 10 (рис. 5) [14].

Методология измерения параметров сигнала АЭ включает такие аспекты:

метод АЭ, основой которого является явление АЭ и ПЭП, как измерительное средство, предназначенное для приема акустических волн и преобразования их в электрический сигнал; методология локации координат дефектов в плоских объектах, основой которого является измерение разницы времени прихода сигнала от источника АЭ на первичные измерительные преобразователи; измерительным средством является блок измерения РВП; метод измерения, сущность которого состоит в измерении самих параметров сигнала АЭ, функционально-связанных с параметрами разрушения

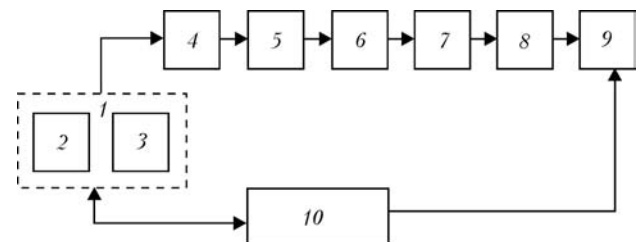


Рис. 5. Структурная схема методологии измерения параметров сигнала АЭ



материала; измерительным средством является АЦП, представляющий измеряемую непрерывную величину кодом.

Используя такую методологию система отбора и обработки сигнала АЭ, регистрирует волновую картинку АЭ по заданному времени прихода и в течение определенного интервала, обусловленного возможностью оперативной памяти для ее записи, и далее обрабатывает информацию по заданной программе. Т. е., на основании зарегистрированного сигнала можно определить максимальное значение амплитуды огибающей САЭ и активность – число зарегистрированных импульсов АЭ за единицу времени согласно нормативному документу [6].

Рассмотрим метрологическое обеспечение измерения физических величин, в частности параметров сигнала АЭ. В работе [4] представлен концептуальный подход к созданию метрологического обеспечения измерений (контроля, диагностирования, прогнозирования, распознавания) параметров исследуемых объектов. Такая концепция метрологического обеспечения применима в области НК материалов.

Соответственно в работе [9] уделено внимание особенностям метрологического обеспечения НК материалов, в частности методам и средствам. Одной из основных задач метрологического обеспечения является метрологическая аттестация средств измерительной техники (измерительных приборов, ИИС). В работе [15] рассмотрены особенности метрологической аттестации измерительных каналов АЭ ИИС согласно требованиям, предъявляемым в государственных стандартах по метрологическому обеспечению ИИС на основании модели измерительного канала и модели погрешности канала. В работе [16] предложена методика определения метрологических характеристик измерительных каналов АЭ системы согласно рекомендациям государственных и межгосударственных стандартов по метрологическому обеспечению ИИС.

Связь параметров сигнала АЭ с параметрами разрушения материалов. Взаимосвязь параметров САЭ с параметрами дефекта материала зависит от самого механизма генерирования сигнала, далее от вида источника АЭ, наделенного соответствующими спектрами амплитуд импульса АЭ, длительности сигнала, ширины частотного спектра. Такое состояние оценивания является подходом к интерпретации результатов НК.

Регистрация определенных параметров САЭ, например, амплитуды и числа импульсов АЭ в техническом аспекте обусловлена чувствительностью ИИС, в частности метрологическими характеристиками используемого типа ПЭП; методом локализации координат источника САЭ; методом отбора САЭ, в котором заложен уровень дискриминации, амплитудный и частотный диапазоны измерения; количеством и структурой измерительных каналов системы отбора сигнала АЭ. Ниже описана связь параметров САЭ с параметрами разрушения материала [17].

Кoeffициент интенсивности напряжений K	$N \sim K^3$; $N \sim K^3 / E$
Суммарное раскрытие трещины δ	$\delta \sim (1 - \gamma)N / (0,2G_T)$
Суммарная площадь раскрытой трещины S	$S \sim N$
Длина скачка трещины Δl	$\Delta l \sim U_a$
Площадь микротрещины ΔS_M	$\Delta S_M \sim U_a$
Скачкообразное увеличение площади трещины ΔS	$\Delta S \sim (\sum U_a)^2 \cdot E / K^2$
Длина трещины l	$L = cT$

Здесь U_a – амплитуда АЭ; c – скорость распространения продольных колебаний; T – длительность первой полуволны АЭ; N – число импульсов АЭ; g – коэффициент Пуассона; G – предел текучести.

Параметры САЭ, регистрируемые ИИС, должны быть четко связаны с той или иной моделью источника АЭ. Известны такие модели микротрещины с дислокационными скоплениями: модели образования микротрещины из дислокационных скоплений; модель роста трещины [21].

Модель образования микротрещины связана с оцениванием энергии упругих колебаний, в которой заложены параметры трещины. Так, в работе [18] энергия АЭ для любой модели определяется из соотношения

$$W_{AЭ} = \frac{1}{2} \frac{E}{25} h l (nb) - \frac{Eb}{50} hl,$$

где h – глубина микротрещины; l – длина микротрещины; n – число дислокаций, обуславливающих начало микротрещины; E – модуль Юнга; b – постоянная решетки материала.

С моделями образования и роста микротрещины связана форма сигнала АЭ. В зависимости от типа источника одиночный сигнал АЭ может быть релаксационного или акселерационного типа [20].

Связь параметров сигнала АЭ с параметрами разрушения материала раскрывается постановкой задачи исследования, моделью трещины, видом исследуемого образца, метрологическими характеристиками АЭ исследуемого ИИС. По литературным данным известны зависимости между интенсивностью САЭ, амплитудой импульсов АЭ и величиной дефекта материала; интенсивностью и временем разрушения; суммарным количеством импульсов и коэффициентом интенсивности; энергией САЭ и длиной трещины [21].

Установлена теоретическая и экспериментальная связь между длиной трещины и амплитудой импульсов сигнала АЭ. Аналитически такое линейное соотношение представлено [20]:

$$\sum_i \Delta l_i \sim \sum_i (A_i')^{2/3},$$

где $A_i' = \int_0^{\Delta t} A_i(t) dt$ – амплитуда зарегистрированного

электрического сигнала для двух типов образцов – стали Ст40Х, материала Д16-АТ.

Суммарный счет АЭ при развитии трещины в условиях монотонной нагрузки связан с коэффициентом интенсивности напряжений [17, 18]



$$N = aK^m,$$

где a , m — параметры, зависящие от материала, его состояния, условий роста трещины для различных материалов и условий испытаний, в частности для определенного вида материалов m принимает значение в диапазоне 4Ш12.

Известна эмпирическая связь энергии САЭ с параметром длины трещины [17]:

$$\sum E_e^2 = K^2 \sum 2\Delta l / E,$$

где K — коэффициент концентрации напряжений в вершине трещины; Δl — прирост длины трещины; E — модуль упругости.

Коэффициент интенсивности напряжения K , как общепринятый параметр разрушения связан со стандартизированным параметром сигнала АЭ числом импульсов N следующим выражением [18, 21]:

$$N = aK^m,$$

где a , m — параметры исследуемого типа образца (материала, конструкции).

Соответственно, измеряя число импульсов N сигнала АЭ (при значении m для соответствующего материала), получаем информацию о росте трещины через параметр l [21].

Выводы

Неразрушающий контроль материалов и конструкций методом АЭ включает процедуру измерения параметров сигнала АЭ, несущего информацию о состоянии объекта исследования. Точность НК материалов обусловлена точностью измерения параметров САЭ. Сам процесс измерения параметров САЭ должен иметь не только метрологическое обеспечение, обеспечивающее единство и точность измерения физических величин, связанных с параметрами разрушения, но и метрологический подход к использованию метода АЭ для НК. В данной статье предложен такой метрологический подход к использованию метода АЭ, учитывающий физическую модель сигнала; методологию локации источника сигнала АЭ; методологию измерения параметров сигнала АЭ; первичные измерительные преобразователи; акустико-эмиссионную ИИС и алгоритм обработки результатов измерений; стандартизированную методологию контроля (диагностирования); метрологическое обеспечение и подход к интерпретации результатов НК объекта на основании моделей САЭ и трещины и взаимосвязи их параметров.

1. Патон Б. Е., Недосека А. Я. О новых подходах в оценке состояния сварных конструкций и определения их оста-

точного ресурса // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2000. — № 1. — С. 3–8.

2. Патон Б. Е., Недосека А. Я. Диагностика и прогнозирование остаточного ресурса сварных соединений // Там же. — 1992. — № 1. — С. 3–17.
3. Чаусов Н. Г., Недосека С. А. Использование метода АЭ для экспресс-контроля разрушения бетонов с добавками пластификаторов // Там же. — 1998. — № 3. — С. 12–16.
4. Концептуальний підхід до створення метрологічного забезпечення вимірювань / Г. В. Микитин, О. П. Бухало, Б. П. Клим, Є. П. Почапський // Укр. метролог. журн. — 2001. — № 4. — С. 5–9.
5. Аспекти міряння параметрів сигналу акустичної емісії / О. П. Бухало, Я. П. Драган, Б. П. Клим, Г. В. Микитин, Є. П. Почапський // Комп'ютерні технології друкарства. — 1999. — №3. — С. 168–183.
6. ДСТУ 4227-2003. Настанови щодо проведення акустико-емісійного діагностування об'єктів підвищеної небезпеки. — Київ: Держспоживстандарт України, 2003. — 25 с.
7. Акустическая эмиссия и ее применение для неразрушающего контроля в ядерной энергетике // В. Н. Артюхов, К. Б. Вакар, В. Н. Макаров, и др. / Под. ред. К. Б. Вакара. — М.: Атомиздат, 1980. — 216 с.
8. Микитин Г. В. Актуальні питання теорії вимірювання. Фіз. зб. НТШ. — Т. 4. — 2001. — С. 347–353.
9. Особливості метрологічного забезпечення неруйнівного контролю / Механіка руйнування і міцність матеріалів. Довідник. посібник / Під заг. ред. В. В. Панасюка. — Т. 5. Неруйнівний контроль. Средства и методы измерений // Под. ред. Е. Г. Шрамкова. — М.: Энергоатомиздат, 2002. — 520 с.
10. Бобренко В. М., Полесская Л. М. Определение координат источника АЭ двумя парами приемников // Дефектоскопия. — 1980. — № 6. — С. 36–41.
11. Холькин О. И. О локационной информативности сигналов АЭ // Там же. — 1983. — № 2. — С. 32–40.
12. Акустическая эмиссия и ее применение для неразрушающего контроля в ядерной энергетике // В. И. Артюхов, К. Б. Вакар, В. И. Макаров и др. / Под. ред. К. Б. Вакара. — М.: Атомиздат, 1980. — 216 с.
13. Ройzman В. П., Ковтун Ю. І., Горошко А. В. Просторова локація джерел акустичної емісії // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. — 2001. — № 2. — С. 84–86.
14. Методологічні основи міряння фізичних величин / Я. Драган, Г. В. Микитин, О. П., Бухало, Б. П. Клим, Є. П. Почапський // Комп'ютерні технології друкарства. — 2000. — № 5. — С. 303–309.
15. Аспекти метрологічної атестації вимірювальних каналів системи відбору і обробки сигналів акустичної емісії // О. П. Бухало, Б. П. Клим, Г. В. Микитин та ін. // Вісн. Тернопіл. держ. техн. ун-ту. — № 3. — Т. 8. — 2003. — С. 91–102.
16. Клим Б. П., Микитин Г. В., Почапський Є. П. Методика визначення метрологічних характеристик вимірювальних каналів акустико-емісійної системи // Фіз. методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. — 2005. — С. 90–94.
17. Бушина Н. А. Исследование пластической деформации металлов методом акустической эмиссии. — Л.: Изд-во Ленинград. ун-та. — 1990. — 156 с.
18. Иванов В. И., Белов В. М. Акустико-эмиссионный контроль сварки и сварных соединений. — М.: Машиностроение, 1981. — 184 с.
19. Методы акустического контроля металлов / Н. П. Алешин, В. Е. Бельый, А. Х. Вопилкин и др. // Под. ред. Н. П. Алешина. — М.: Машиностроение, 1989. — 456 с.
20. Болотин А. Н., Маслов Л. А., Полунин В. И. Установление корреляции между размером трещины и амплитудой импульсов АЭ // Дефектоскопия. — 1975. — № 4. — С. 119–122.
21. Основы экспериментальной механики разрушения / И. М. Керштейн, В. Д. Клошников, Е. В. Ломакин и др. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1989. — 140 с.



ДИАГНОСТИКА СИГНАЛОВ: СРАВНЕНИЕ ОБЕИХ КОМПОНЕНТ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ И СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ МОЩНОСТИ

Л. М. ГЕЛЬМАН

Предложен новый подход к формированию диагностических признаков для случаев, когда преобразования Фурье используются для технической диагностики и распознавания образов. Подход состоит в использовании одновременно двух новых диагностических признаков: действительной и мнимой компонент преобразования Фурье. Показано, что указанный подход является более общим, чем подходы, основанные на спектральной плотности мощности и фазовом спектре, и обеспечивает более высокую эффективность диагностики, чем подход, основанный на спектральной плотности мощности.

A new approach is proposed to formation of the diagnostic features for cases, when Furrier transforms are used for technical diagnostics and image recognition. The approach consists in using two new diagnostic features simultaneously, namely the actual and false components of Fourier transform. It is shown that the above approach is a more general one than those based on spectral power density and phase spectrum, and provides a higher effectiveness of diagnostics than the approach based on spectral power density.

Новый подход к формированию диагностических признаков был предложен для случаев использования преобразования Фурье для технической диагностики и распознавания образов. Подход состоит в использовании одновременно двух новых диагностических признаков: действительной и мнимой компонент преобразования Фурье. В работах [1, 2] показано, что указанный подход является более общим, чем подходы, основанные на спектральной плотности мощности и фазовом спектре, и обеспечивает более высокую эффективность диагностики, чем подход, основанный на спектральной плотности мощности.

Учет статистических зависимостей между диагностическими признаками, как показано в работах [3–5], повышает эффективность диагностики. Поэтому для реализации предложенного подхода необходим учет статистических зависимостей между действительной и мнимой компонентами преобразования Фурье.

Однако в работах [1, 2] сравнение эффективности новых признаков и спектральной плотности мощности проведено без учета статистических зависимостей между новыми признаками.

Цель настоящей статьи: использовать предложенный в [1, 2] подход для диагностики гауссовых сигналов с учетом статистических зависимостей между предложенными признаками и сравнить диагностическую эффективность предложенного подхода с подходом, основанным на спектральной плотности мощности.

Теоретический анализ. Рассмотрим двухклассовую диагностику стационарных гауссовых центрированных сигналов $x(t)$ с различными дисперсиями $\sigma_{x0}^2, \sigma_{x1}^2$ и идентичными нормированными автокорреляционными функциями $R_{x0} = R_{x1} = R_x$ для гипотез $H_j, j = 0, 1$. Диагностическая инфор-

мация содержится в коротком преобразовании Фурье на частоте ω_x . Предлагаемый подход заключается в одновременном использовании действительной X_R и мнимой X_I компонент короткого преобразования Фурье на частоте ω_x как диагностических признаков:

$$X_R = \int_0^{t_1} x(t) \cos \omega_x t dt, \quad (1)$$

$$X_I = \int_0^{t_1} x(t) \sin \omega_x t dt, \quad (2)$$

где t_1 — длительность сигналов, $t_1 \neq \infty$.

С учетом стационарности сигналов коэффициент взаимной корреляции между признаками (1)-(2) может быть представлен следующим образом:

$$K_{RI} = m(X_R X_I) = \int_0^T \int_0^T K_x(t_2 - t_1) \cos \omega t_1 \sin \omega t_2 dt_1 dt_2, \quad (3)$$

где m — оператор математического ожидания.

Используя новую переменную $\sigma = t_2 - t_1$, изменяя порядок интегрирования между переменными σ и t_1 и интегрируя по t_1 , после преобразований получаем окончательное выражение:

$$K_{RI} = \frac{\sigma_x^2 \int_0^T r_x(\tau) [\cos \omega \tau - \cos \omega(2T - \tau)] d\tau}{2\omega}. \quad (4)$$

Используя полученное выражение (4) и выражения, представленные в работе [6] для среднеквадратических отклонений σ_R и σ_I соответственно компонент X_R и X_I , нормированный коэф-



коэффициент взаимной корреляции между диагностическими признаками X_R и X_I после преобразований может быть записан в форме:

$$r_{RI} = \frac{K_{RI}}{\sigma_R \sigma_I} = \left(\int_0^T r_x(\tau) [\cos \omega \tau - \cos \omega(2T - \tau)] d\tau \right) / (AB)^{1/2}, \quad (5)$$

где $A = \int_0^T r_x(\tau) [\omega(T - \tau) \cos \omega \tau - \sin \omega \tau] d\tau;$

$B = \int_0^T r_x(\tau) [\omega(T - \tau) \cos \omega \tau + \sin \omega \tau] d\tau.$

Выражения (4), (5) новые и носят общий характер. Они получены для произвольных стационарных случайных сигналов и учитывают следующие важные параметры сигналов и короткого преобразования Фурье: нормированную автокорреляционную функцию сигналов, дисперсию и длительность сигнала, частоту преобразования Фурье. Из выражений (4), (5) следует, что в общем случае для короткого преобразования Фурье коэффициент взаимной корреляции между новыми признаками (1), (2) не равен нулю. Поэтому при принятии решений о состоянии объектов диагностики следует учитывать корреляцию между диагностическими признаками (1), (2).

Из выражения (5) найдем, что для идентичных нормированных автокорреляционных функций сигналов для гипотез H_j ; нормированный коэффициент взаимной корреляции между диагностическими признаками (1), (2) также идентичен для гипотез H_j , т. е. $r_0 = r_1 = r$.

Так как сигналы $x(t)$ гауссовы, то ввиду линейности преобразований (1), (2) получим, что двумерная условная функция распределения признаков (1), (2) также гауссова. Воспользовавшись этой функцией распределения, после преобразований получим отношение правдоподобия предложенных признаков в форме:

$$S_0 = AX_R^2 + BX_I^2 + CX_RX_I + D, \quad (6)$$

где

$$S_0 = \ln \frac{W(X_R, X_I | H_1)}{W(X_R, X_I | H_0)}; \quad (7)$$

$$A = \frac{\sigma_{R1}^2 - \sigma_{R0}^2}{2(1 - r^2)\sigma_{R0}^2\sigma_{R1}^2}; \quad B = \frac{\sigma_{I1}^2 - \sigma_{I0}^2}{2(1 - r^2)\sigma_{I0}^2\sigma_{I1}^2}; \quad (8)$$

$$C = \frac{r(\sigma_{R0}\sigma_{I0} - \sigma_{R1}\sigma_{I1})}{(1 - r^2)\sigma_{R0}\sigma_{R1}\sigma_{I0}\sigma_{I1}}; \quad D = \ln \frac{\sigma_{R0}\sigma_{I0}}{\sigma_{R1}\sigma_{I1}}.$$

Воспользовавшись данными, приведенными в работе [6], получим:

$$\frac{\sigma_{R1}}{\sigma_{R0}} = \frac{\sigma_{I1}}{\sigma_{I0}} = \frac{\sigma_{x1}}{\sigma_{x0}}.$$

Из выражения (6) видно, что в общем случае для рассматриваемой диагностики отношение правдоподобия предложенных признаков не является спектральной плотностью мощности, которая может быть представлена в форме [7] (без учета постоянных сомножителей, которые несущественны для диагностики):

$$S_1 = X_R^2 + X_I^2. \quad (9)$$

Из выражений (6), (8), (9) получим, что если одновременно выполняются следующие условия: а) диагностические признаки (1), (2) некоррелированы, т. е. $r = 0$; б) среднеквадратические отклонения диагностических признаков при обеих гипотезах одинаковы, т. е. $\sigma_{Rj} = \sigma_{Ij} = \sigma_j$, то отношение правдоподобия (6) и спектральная плотность мощности (9) отличаются только постоянным сомножителем, который несущественен для диагностики.

Оценим и сравним диагностическую эффективность признаков (1), (2) и признака (9), используя критерий Фишера [8]:

$$F_0 = \frac{[m(S_0/H_1) - m(S_0/H_0)]^2}{\sigma^2(S_0/H_1) + \sigma^2(S_0/H_0)}, \quad (10)$$

$$F_1 = \frac{[m(S_1/H_1) - m(S_1/H_0)]^2}{\sigma^2(S_1/H_1) + \sigma^2(S_1/H_0)}, \quad (11)$$

где σ^2 — оператор дисперсии.

Используя выражения (1)–(3), (6), (8)–(11), после преобразований получаем:

$$F_0 = 1 - \frac{2}{b + 1/b}, \quad (12)$$

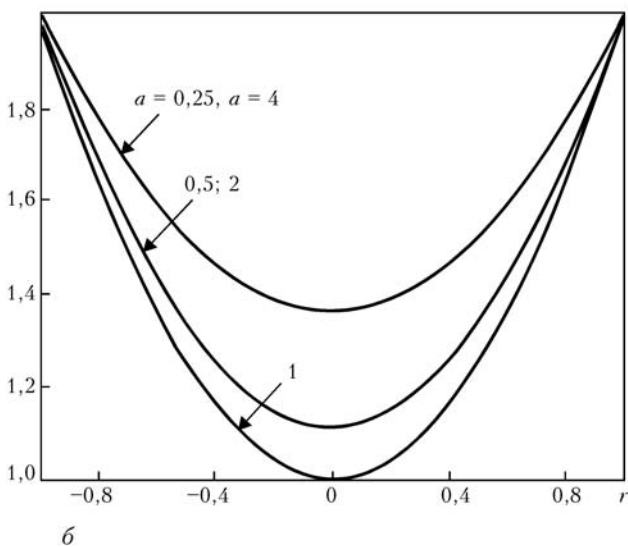
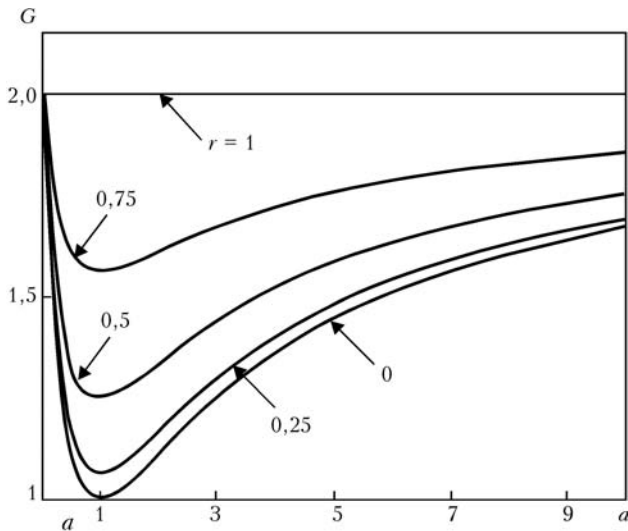
$$F_1 = F_0/G, \quad (13)$$

$$G = \frac{2(a^2 + 2r^2a + 1)}{(a + 1)^2}, \quad (14)$$

где параметр b характеризует различие дисперсии сигналов для гипотез H_j , $b = \frac{\sigma_{x1}^2}{\sigma_{x0}^2}$; параметр G ха-

рактеризует выигрыш в эффективности диагностики, параметр a характеризует различие дисперсий диагностических признаков (1), (2).

Для идентичных нормированных автокорреляционных функций сигналов для диагностируемых гипотез H_j , воспользовавшись данными из работы [6], получим:



Зависимость увеличения (прироста) эффективности диагностики в зависимости от коэффициента корреляции r (а) и параметра a (б), характеризующего разность дисперсий признаков (1, 2)

$$a = \frac{\sigma_{R0}}{\sigma_{I0}} = \frac{\sigma_{R1}}{\sigma_{I1}}$$

Из выражений (12)–(14) видно, что диагностическая эффективность нового подхода зависит только от различия дисперсий сигналов для диагностируемых гипотез H_j и не зависит от коэффициента взаимной корреляции между признаками и от параметра a , так как при предлагаемом подходе учитывается взаимная корреляция между признаками и различие дисперсий признаков; диагностическая эффективность подхода, основанного на спектральной плотности мощности, зависит как от различия дисперсий сигналов для диагностируемых гипотез H_j , так и от коэффициента взаимной корреляции между признаками (1), (2) и от параметра a .

Диагностическая эффективность этого признака уменьшается при увеличении модуля коэффициента взаимной корреляции между признаками (1), (2) и увеличении параметра a от значения, равного 1, так как при подходе, основанном на спектральной плотности мощности, не учитывается

взаимная корреляция между признаками и различие дисперсий признаков.

Выигрыш (14) в эффективности диагностики возрастает при движении параметра a от 1 для любых значений нормированных коэффициентов взаимной корреляции признаков (рисунок, а); увеличении модуля коэффициента взаимной корреляции между признаками для любых значений параметра a (рисунок, б).

Оценим, как влияет учет статистических зависимостей между признаками (1), (2) на эффективность диагностики, используя следующий критерий:

$$f = F_0 / F_2, \quad (15)$$

где

$$F_2 = \frac{[m(S_2/H_1) - m(S_2/H_0)]^2}{\sigma^2(S_2/H_1) + \sigma^2(S_2/H_0)};$$

$$S_2 = \ln \frac{W(X_R | H_1)W(X_I | H_1)}{W(X_R | H_0)W(X_I | H_0)}; \quad (16)$$

$$S_2 = A_1 X_R^2 + B_1 X_I^2 + D;$$

$$A_1 = A \quad (r = 0), \quad B_1 = B \quad (r = 0);$$

S_2 — отношение правдоподобия, полученное без учета статистических зависимостей между признаками (1), (2); F_2 — критерий Фишера для отношения правдоподобия S_2 .

Используя выражения (1), (2), (8), (12), (15), (16), после преобразований получаем

$$f = r^2 + 1. \quad (17)$$

На основании этого выражения можно сделать вывод, что учет статистических зависимостей между предложенными диагностическими признаками повышает эффективность диагностики.

Критерий (17), характеризующий повышение эффективности диагностики, обусловленное учетом статистических зависимостей признаков, возрастает с ростом модуля коэффициента взаимной корреляции между признаками (1), (2).

Выводы

Рассмотрена диагностика стационарных гауссовых сигналов на основе одновременного использования новых обобщенных признаков: действительной и мнимой составляющих преобразования Фурье; при этом учитывались статистические зависимости между указанными диагностическими признаками.

Коэффициент и нормированный коэффициент взаимной корреляции между предложенными диагностическими признаками получены впервые для произвольных стационарных случайных сигналов.

Показано, что критерий (17), характеризующий повышение эффективности, обусловленное учетом статистических зависимостей признаков, возрастает с ростом модуля коэффициента взаимной корреляции между признаками.

В общем случае для рассматриваемой диагностики спектральная плотность мощности не явля-



ется оптимальным диагностическим признаком и представляет только частный случай отношения правдоподобия предлагаемых новых признаков. Использование спектральной плотности мощности оптимально, если одновременно: а) коэффициент взаимной корреляции между новыми признаками равен нулю; б) дисперсии этих признаков одинаковы.

Выигрыш (14) в эффективности диагностики возрастает при увеличении модуля коэффициента взаимной корреляции между признаками, а также при движении параметра a , характеризующего различие дисперсий признаков, от 1. Поэтому использование предлагаемых признаков обеспечивает преимущество в эффективности диагностики по сравнению с использованием спектральной плотности и мощности при произвольных величинах коэффициента взаимной корреляции между предлагаемыми признаками и параметра, характеризующего различие дисперсий признаков (за исключением случая, упомянутого выше). Указанный подход был успешно применен для диагностики усталостных трещин и демпфирования в лопатках турбомашин [9, 10].

Мы рекомендуем использовать одновременно действительную и мнимую компоненты преобразования Фурье как наиболее базисные диагностические признаки, особенно если коэффициент взаимной кор-

реляции между признаками не равен нулю и дисперсии компонент преобразования Фурье не равны между собой.

1. *Gelman L. M., Braun S. G.* The optimal usage of the Fourier transform for pattern recognition *Mechanical Systems and Signal Processing*. — 2001. — **15**(3). — P. 641–645.
2. *Gelman L. M., Braun S. G., Petrunin I. V.* The optimal usage of the Fourier transform for condition monitoring and diagnostics In *Proceedings of the International Conference on Condition Monitoring*. — Swansea, UK, 2001. — P. 350–357.
3. *Bilmes J. A.* Maximum mutual information based reduction strategies for cross-correlation based joint distributional modeling In *Proceedings of the International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*. — Seattle, 1998. — P. 469–472.
4. *Fukunaga K.* Introduction to statistical pattern recognition. — Academic Press, New York, 1990.
5. *Devijver P. A., Kittler J.* Pattern recognition: a statistical approach. — Prentice Hall, 1982.
6. *Gelman L. M., Sadovaya V. G.* Optimization of the resolving power of a spectrum analyzer when detecting narrow-band signals // *Telecommunications and Radio Engineering*. — 1980, **35**(11). — P. 94–96.
7. *Kammler D. W.* A first course in Fourier analysis. — Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 2000.
8. *Young T. Y., Fu K.-S.* Handbook of Pattern Recognition and Image Processing. — Academic Press, Inc, 1986.
9. *Gelman L., Astley K., Petrunin I.* Condition monitoring of fatigue cracks in machinery blades // *Insight*. — 2003. — **45**, № 8. — P. 539–541.
10. *Vibroacoustical damping diagnostics: novel approach. Specialized keynote paper* // L. Gelman, M. Crocker, M. Sanderson, C. Thompson // *Eleventh International Congress on Sound and Vibration*. — Russia, 2004.

Поступила в редакцию
22.12.2005

КОРОЗИЯ-2006 МІЖНАРОДНА ВИСТАВКА

6-8 червня
Львівський Будинок вчених
вул. Листопадового Чину, 6
м. Львів



Європейська корозійна федерація
Національна академія наук України
Міністерство освіти і науки України
Міністерство промислової політики України
Українська асоціація корозіоністів
Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка НАН
України

Адреса оргкомітету:
Україна, 79601, м. Львів-МСП, вул. Наукова, 5
тел.: (0322) 63-15-77, (032) 229-62-53
факс: (0322) 63-15-77
E-mail: pokhmurs@ipm.lviv.ua, kornii@ipm.lviv.ua
Web: <http://www.ipm.lviv.ua/corrosion>

Тематика експозиції:

- обладнання для підготовки поверхні перед нанесенням покриттів;
- технології та обладнання для нанесення захисних металевих, полімерних і лакофарбових покриттів;
- протикорозійні та захисні матеріали;
- обладнання для електрохімічного захисту металоконструкцій;
- засоби неруйнівного контролю та технічної діагностики;
- прилади та методи для випробувань корозійної стійкості матеріалів;
- інгібітори та біоциди;
- екологічні аспекти протикорозійного захисту.

Одночасно з виставкою буде працювати VIII Міжнародна наукова конференція «Проблеми корозії та протикорозійного захисту конструкційних матеріалів», що дасть можливість підприємцям ознайомитися з найновішими та перспективними дослідженнями в галузі корозії та, на основі цього, оцінити шляхи та об'єми інвестицій в розвиток технологій протикорозійного захисту матеріалів.



ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУИРОВАНИЯ НАКЛОННЫХ ЭМА-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

В. И. ГОРДЕЛИЙ, В. Е. ЧАБАНОВ

Описаны основные трудности, возникающие при проектировании наклонных электромагнитно-акустических преобразователей, а также способы повышения их чувствительности и помехозащищенности.

The main difficulties arising is design of electromagnetoacoustic transducers are described, as well as the methods to increase their sensitivity and noise protection.

Необходимость разработки надежных электромагнитно-акустических преобразователей (ЭМАП) обусловлена, в первую очередь, тем, что традиционный УЗК на основе пьезопреобразователей не позволяет осуществлять контроль изделий бесконтактно, в условиях высоких и низких температур, затруднен при дефектоскопии движущихся изделий и проч. Это ограничивает сферу экономически оправданного и технически достоверного контроля с помощью ультразвука, затрудняет применение его при поточном производстве, препятствует автоматизации контроля. ЭМАП дают возможность во многом разрешить указанные проблемы, однако их чувствительность, помехоустойчивость, избирательность сигналов, особенно при наклонном контроле оставляют желать лучшего.

Это объясняется, в первую очередь, недостаточной теоретической проработкой этой проблемы. Поскольку параметров, от которых зависит работа ЭМА-преобразователей, много, то только экспериментальная оптимизация конструкции преобразователей, зависящая от их корреляции, становится непростой и дорогостоящей. Некоторые параметры не могут быть получены путем эксперимента, а поэтому хорошо работающие ЭМАП в большей мере обязаны своей конструкции таланту и искусству разработчиков, чем надежной теории, экспериментальному или аналитическому анализу их работы.

Теоретические исследования ЭМАП осуществлялись многими исследователями, и прежде всего авторами работ [1–6]. Вместе с тем некоторые важнейшие особенности их работы до настоящего времени остаются не выясненными. Так, не установлено воздействие на характеристики возбуждаемого звука экранов (магнитопроводов), их параметров, влияние различных конструктивных зазоров, неизбежных при изготовлении преобразователей. Не определено в достаточной мере влияние формы импульсных сигналов на характеристики генерируемых акустических волн и т. д. И хотя проектирование прямых ЭМАП обычно не встречает особых трудностей, разработка надежно работающих высокочувствительных и помехозащищенных наклонных ЭМАП в настоящее время является сложной задачей.

Авторами разработан физико-математический аппарат, применение которого позволяет во многом процесс проектирования требуемых ЭМАП сво-

дить к численному моделированию их конструкции. Его особенности описаны в статьях [7, 8]. Основные положения теории авторами проверены неоднократно не только численно, но и экспериментально, что подтвердило адекватность получаемых с их помощью выводов. Это позволило установить некоторые принципы проектирования надежно работающих прямых и наклонных ЭМАП, выявить основные требования к их магнитному и электронному трактам.

Некоторые из них приводятся в настоящей работе. В частности, установлены следующие положения

1. Проектировать прямые ЭМАП, катушка которых состоит из прямых синфазно нагруженных токопроводов, сравнительно несложно. Тем не менее, трудности имеются и здесь. В частности, они заключаются в необходимости оптимизации магнитной системы, чтобы индукция постоянного магнитного поля в наименьшей степени зависела от зазора между магнитопроводом и поверхностью контролируемого изделия (данная трудность характерна и для наклонных ЭМАП), а также в выборе рабочей частоты, при которой достигается требуемая чувствительность контроля, и в то же время сохраняются приемлемые соотношения сигнал/помеха. Эта проблема является достаточно острой, поскольку амплитуды излучаемых и принимаемых ЭМАП сигналов оказываются тем большими, чем выше рабочая частота. В то же время, отражающая способность дефектов повышается с ростом частоты.

При проектировании ЭМАП важную роль играет правильный подбор соотношения длины катушки и поперечных размеров магнитопровода, устанавливающих ширину диаграмм направленности. Кроме того, на амплитуды сигналов также существенно влияет материал магнитопровода (экрана). При этом оказывается, что чем меньше их электропроводность, тем выше при прочих равных условиях амплитуды излучаемых и принимаемых сигналов. На амплитуду и ширину «мертвой зоны» существенное воздействие оказывают форма и длительность импульсных сигналов, однако конкретные их значения могут быть установлены только путем численного или практического эксперимента.

2. ЭМАП, предназначенные для работы под наклонными углами, работают устойчиво только в том случае, если максимумы их излучения со-

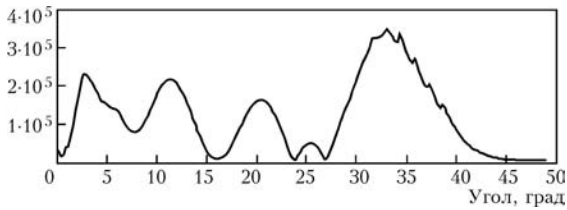


Рис. 1. Расчетная характеристика направленности типового ЭМАП (Па), спроектированного без компенсации паразитных углов излучения, на рабочей частоте 0,9 МГц, при наличии зазора между преобразователем и поверхностью изделия, равного 0,5 мм

ответствуют углам 30... 40° и 55... 60°. Причем, устойчивость первого максимума обеспечивается влиянием третьего критического угла излучения (при котором $\theta = \arcsin(c_t/c)$, где c_t и с соответственно скорости распространения поперечной и продольной волны в материале контроля). Устойчивость второго максимума обусловлена тем, что, с одной стороны, путем вариации базы диполей и длины волны можно добиться максимума сигнала при требуемом рабочем угле, а с другой — имеется явно выраженное ограничение по излучению поперечных волн сосредоточенными источниками, обойти которое невозможно [9]. На всех других углах максимумы излучения неустойчивы и способны перемещаться в пространстве в зависимости от вариации частоты, длительности сигналов, размеров всевозможных зазоров и проч.

3. ЭМА-преобразователи, работающие под наклонными углами, способны одновременно с сигналами, излучаемыми и принимаемыми под описанными выше рабочими углами, генерировать и фиксировать также сигналы со значительными амплитудами под меньшими углами. Это обусловлено тем, что интерферировать способны не только импульсы, излучаемые соседними токопроводами, но и более дальними. Это ведет к расширению диаграмм направленности и понижает чувствительность, помехозащищенность ЭМАП. Данная проблема решается путем подбора материалов экрана, характером намотки катушек, а также выбором нужной формы импульсного сигнала. Это можно проделать с помощью численного эксперимента с применением теории ЭМАП, разработанной авторами данной статьи с последующей проверкой полученных рекомендаций экспериментально (рис. 1, 2).

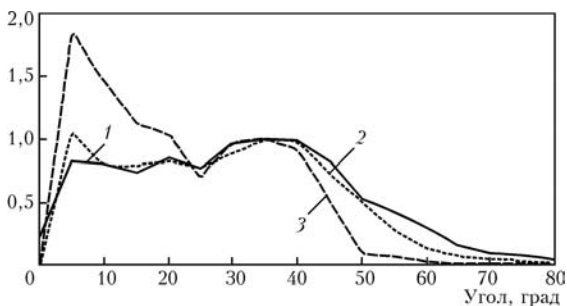


Рис. 2. Сравнительные нормированные экспериментально измеренные диаграммы направленности того же преобразователя (вольты на выходе усилителя) при различных зазорах, мм: 1 — 0,5; 2 — 1; 3 — 2

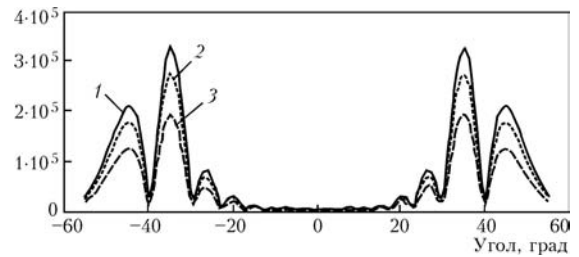


Рис. 3. Расчетные диаграммы направленности излучения оптимизированного ЭМА-преобразователя, предназначенного для работы под углом 35° при различных зазорах, мм: 1 — 0,5; 2 — 1; 3 — 2

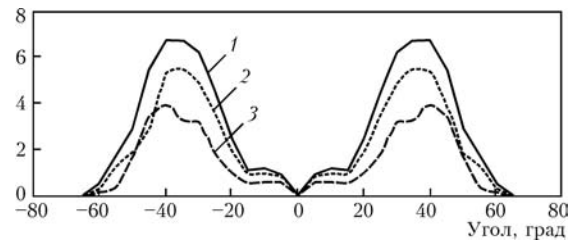


Рис. 4. Экспериментально измеренные и статистически обработанные характеристики направленности излучения того же ЭМАП при тех же зазорах (вольты на выходе усилителя) (зазоры соответствуют показанным на рис. 3)

На рис. 3, 4 показаны оптимизированные характеристики ЭМАП, работающего на той же частоте.

Характерно, что тот же самый преобразователь, возбужденный на другой частоте, уже способен надежно работать и под другим углом. Его расчетные и экспериментальные характеристики показаны на рис. 5, 6.

Нетрудно видеть, что и здесь результаты расчета и эксперимента качественно совпадают. А провалы, наблюдаемые при расчетах, как правило, плохо наблюдаются в эксперименте. Важно отметить, что если амплитуды паразитных сигналов, излучаемых обычным ЭМАП (см. рис. 2), с увеличением зазора растут непропорционально, то у оптимизированных вплоть до зазора 2 мм такого не происходит.

4. Наклонные ЭМАП одновременно излучают (и принимают) сигналы симметрично относительно нормали к поверхности контроля. Значительное нарушение этой симметрии возможно только при использовании нескольких генераторов, питающихся с различными фазами тока разные токопроводы. Вместе с тем можно добиться этого и регулированием формы импульсного сигнала, подбором материала и выбором ширины экрана, характером намотки катушки, неравномерностью используемой в ней базы диполей и др. В частности, такой пре-

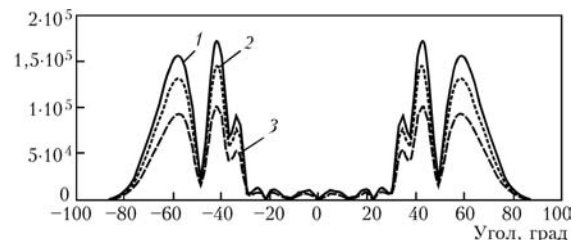


Рис. 5. Расчетная характеристика оптимизированного ЭМАП при его работе на другой частоте (зазоры те же)

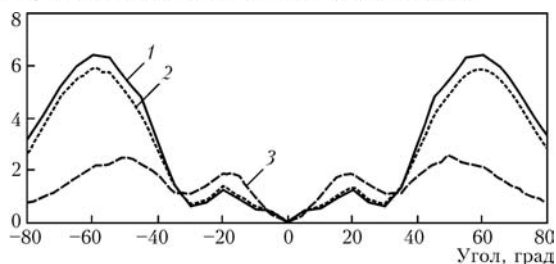


Рис. 6. Экспериментальная характеристика оптимизированного ЭМА при его работе на другой частоте (зазоры те же)

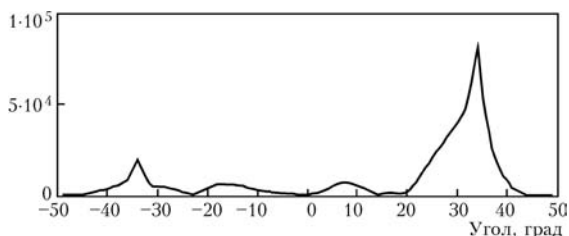


Рис. 7. Акустическое поле ЭМАП с односторонним излучением

образователь был смоделирован численным путем и его характеристика показана на рис. 7.

5. При проектировании наклонных ЭМАП принцип моделирования не работает. Поэтому для каждого случая, для всякой рабочей частоты или требуемой направленности приходится подбирать собственные параметры преобразователя.

На рис. 8 показан внешний вид некоторых из разработанных ЭМАП.

1. Буденков Г. А., Гуревич С. Ю. / Дефектоскопия. — 1981. — № 5. — С. 5–33.

НПП «ВИГОР»,
Москва



Рис. 8. Некоторые типы ЭМАП, спроектированных в НПП «ВИГОР» и работающих в созданных им установках НК

2. Шкарлет Ю. М. Бесконтактные методы ультразвукового контроля. — М: Информприбор, 1974. — 57 с.
3. Dobbs R. Phys. Acoustics. — V.10. — Academic Press. New York and London, Ch.3. — P. 1073.
4. Комаров В. А. Квазистационарное ЭМА-преобразование в металлах. — Свердловск, УНЦ АН СССР, 1986.
5. Шубаев С. Н. Возбуждение упругих волн в металлическом проводнике электромагнитным методом // Дефектоскопия. — 1974. — № 4. — С. 45–55.
6. Ильин И. В. К вопросу о возбуждении объемных волн в ферромагнитных металлах электромагнитным акустическим преобразователем // Там же. — 1987. — № 12. — С. 13–28.
7. Горделий В. И. Теоретическое и экспериментальное исследование ЭМА-преобразователей / Тр. 4-й Нац. науч.-техн. конф. и выставки «Не разрушающий контроль и техническая диагностика». — Киев, 2003. — С. 312–317.
8. Чабанов В. Е., Горделий В. И. Наклонные электромагнитно-акустические преобразователи и анализ их работы // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2004. — № 2. — С. 40–45.
9. Чабанов В. Е. Лазерный ультразвуковой контроль материалов. — Л: МГУ, 1986. — 231 с.

Поступила в редакцию
22.02.06



**2-я МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ И
ВЫСТАВКА «СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ
КАЧЕСТВА И ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ»**

19–20 октября 2006 года

Белорусско-Российский университет и Институт прикладной физики НАН Беларуси 19-20 октября 2006 года проводят 2-ю международную конференцию «Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов». Одновременно с конференцией Белорусская ассоциация НКИТД организует выставку приборов и систем контроля.

Основная тематика

1. Дефектоскопия материалов и промышленных изделий.
2. Контроль структуры и физико-механических характеристик материалов и изделий.
3. Контроль геометрических параметров объектов.
4. Мониторинг, диагностика и прогнозирование остаточного ресурса технических объектов.
5. Компьютерные технологии в неразрушающем контроле.

Круглый стол. Подготовка кадров и сертификация персонала в области неразрушающего контроля и технической диагностики.

Контактные адрес и телефоны:

тел.: (+375) 222 225212; (+375) 222 236422; fax: (+375) 222 225821;
E-mail: konf@bru.mogilev.by sss.bru@tut.by



ПРИЛАДИ ТА МЕТОДИ ВІБРОКОНТРОЛЮ І ВІБРОДІАГНОСТУВАННЯ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ АГРЕГАТІВ ТА КОМПРЕСОРНИХ УСТАНОВОК ГАЗОТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ УКРАЇНИ

С. О. САПРИКІН

Вперше проведено цілеспрямовані комплексні дослідження в експлуатаційних умовах КС і АГНКС і на стендах. Встановлено допустимі рівні вібрації в різних частотних діапазонах для формування попереджувальних і аварійних сигналів для визначення діагностичних ознак. Обґрунтовано вибір величини затримки в часі вібраційного сигналу для формування аварійних сигналів. Запропоновано ряд нових діагностичних ознак. На підставі отриманих теоретичних і експериментальних результатів розроблені методи, а також стаціонарні і переносні прилади для віброконтролю і вібродіагностування, що витримали приймальні випробування і впроваджені на об'єктах газової промисловості України. Створено ряд нормативних документів з діагностики.

For the first time purposeful complex researches under operation conditions of a compressor station and an auto-motive gas-filling compressor station and on stands are resulted in this scientific work. Allowable vibration levels in different frequency ranges to form warning and alarm signals and for determination of diagnostics–signs are established. For formation of warning and alarm signals, the choice of criteria and the value of temporary hold in time of the vibration signal is substantiated. A new number of the diagnostics signs are proposed. On the basis of obtained theoretical and experimental results had been developed methods, stationary and portable devices for the vibration control and the vibration diagnosis, which held the acceptance test and were installed at objects of Ukrainian gas industry. A number of normative documents for diagnostics is originated.

Вступ. Україна має найбільшу у світі газотранспортну систему довжиною 36,7 тис. км, до складу якої входять 72 компресорні станції (КС) із газоперекачувальними агрегатами (ГПА) 27 типів загальною потужністю 5609 МВт, 89 автомобільних газонаповнювальних компресорних станцій (АГНКС) із п'ятьма типами компресорних установок (КУ) вітчизняного й закордонного виробництва та мережа підземних сховищ газу. На сьогодні 50 % парку ГПА відпрацювали встановлений моторесурс або близькі до нього. Експлуатація такого численого й різноманітного парку з різним моторесурсом і строком експлуатації вимагає нових підходів до сервісного обслуговування. Зупинки ГПА та КУ для ремонту здійснюється відповідно до положення про планово-переджувальний ремонт незалежно від технічного стану в певні інтервали часу. Однак неприпустимо часто агрегати виводяться в ремонт через аварії. Над проблемою підвищення надійності ГПА та КУ працюють академічні, галузеві науково-дослідні й проектно-конструкторські організації, науково-виробничі та інші підприємства. Для її вирішення розгорнуті фундаментальні й прикладні дослідження. Діагностування ГПА та КУ — одна з основних й актуальних проблем у газотранспортній системі як з теоретичної й експериментальної, так і з практичної точок зору. *Вібродіагностування — найважливіший напрямок технічної діагностики ГПА.* Ця проблема до останнього часу залишалася невирішеною. Газотранспортні й видобувні, переробні підприємства зазнають великих втрат

внаслідок неефективності існуючих систем віброконтролю та вібродіагностування. Системи віброконтролю, що встановлені на ГПА з газотурбінним (ГТУ) та електроприводом (ЕГПА), часто реагують на короточасні сплески вібрації й формують хибні аварійні сигнали для зупинки ГПА у випадках, що не представляють для агрегата небезпеки або навпаки. Зупинені через високу вібрацію агрегати піддають пробним пускам для додаткового вібраційного діагностування, незважаючи на їхній аварійний стан.

Мета й завдання дослідження. Мета роботи полягає у підвищенні ефективності експлуатації газоперекачувального обладнання за рахунок отримання оперативної інформації про його фактичний технічний стан шляхом створення та впровадження переносних і стаціонарних приладів та систем, технологій, методик та програмних засобів для безперервного і періодичного віброконтролю та вібродіагностування основних вузлів ГПА та КУ з урахуванням індивідуальних динамічних характеристик вібрації та з застосуванням комплексно визначених нових діагностичних ознак.

Зміст роботи. Для теоретичних досліджень динамічних особливостей роботи ГПА та КУ використані методи: аналізу динамічної взаємодії конструктивних елементів, гідродинамічної теорії змащення й удару, газодинамічних розрахунків, оцінки вібраційних характеристик, які дозволили проаналізувати силові впливи, що збуджують вібрацію й обґрунтувати нові вібродіагностичні ознаки основних вузлів, величину часової затримки формування аварійних сигналів для стаціонарних систем віброконтролю.



СПВК-14



СПВК-8



СПВК-3

Рис. 1. Стационарні пристрої віброконтролю і вібродіагностування ГПА та КУ АГНКС

У якості нових діагностичних ознак уперше використані: частоти власних і змушених коливань вузлів залежно від зміни режиму роботи; амплітуди поступальних і малих кутових коливань в обраному напрямку й фазові зсуви; жорсткість підшипникових опор; чітко фіксований на часовій осі імпульсний сигнал при стабільній частоті обертання для визначення руйнування антифрикційного шару вкладиша підшипника, характерного для роторних машин; вібраційні сигнали, що надходять від двох підшипників, розташованих на одній шатунній шийці колінчастого вала; величини кутів між площиною руху шатуна й векторами максимальної амплітуди вібрації; вимірювання у єдиному масштабі часу вібраційних переміщень всіх підшипників роторів; вібраційні параметри для визначення розцентрувань між валами нагнітача, редуктора й зубчастих муфт.

Для підтвердження й обґрунтування діагностичних ознак розроблено методики й проведено комплексні експериментальні дослідження в експлуатаційних умовах: з встановленням віброперетворювачів безпосередньо на підшипникові опори всередині ГТН-25, а для ГПА-16 і СТД-4000 — у районі підшипникових опор зовні із глибоким аналізом під час ремонту; з послідовним встановленням препаративних вкладишів на шийці колінчастого вала ГМК 10ГКН і МК8 з імітацією різних дефектів підшипників ковзання та на одноциліндровому відсіку ГМК з ідеальним технічним станом; з встановленням відомих дефектів для ЦПГ КУ, які дозволили отримати залежності рівнів вібрації від напрацювання, потужності й технічного стану, установити допустимі рівні вібрації по частотних смугах для формування попереджувальних й аварійних сигналів з виділенням діагностичних ознак, які використані при розробці технологій, апаратних і програмних засобів віброконтролю та вібродіагностування ГПА та КУ.

Розроблені стационарні (СПВК-14, СПВК-8, СПВК-3, Пульсар-В) та переносні (АВ-ЕГПА, СВиК-ГМК, СВиК-60, СВиК-100, АСОК) системи та технології віброконтролю і вібродіагностування, які дозволяють визначити дефекти основних вузлів

працюючих агрегатів на ранній стадії їх виникнення, зупинити ГПА і КУ для ремонту за умови дійсної необхідності з урахуванням технічної та економічної доцільності — за фактичним станом, прогнозувати і раціонально випрацювати залишковий ресурс, попереджувати аварійні ситуації, зменшувати обсяги ремонтів і профілактичних оглядів, оцінювати якість ремонтних робіт.

Уперше розроблені за участю автора апаратні та програмні засоби стаціонарних систем віброконтролю й вібродіагностування основних вузлів: для ГПА ГТН-25 — СПВК-14; для ГПА-16 (двигун ДЖ-59) і ГТ-750-6 — СПВК-8; для п'яти типів КУАГНКС — СПВК-3 (рис. 1) [1].

Вібродіагностична система ГТН-25 складається з апаратних засобів, що включають: віброперетворювачі, двоканальні підсилювачі заряду, систему віброконтролю (СПВК-14), комутатор, плату контролера АЦП для персонального комп'ютера (ПК). Апаратні засоби забезпечують: реєстрацію вібраційних сигналів від семи підшипникових вузлів; підсилення сигналів; безперервний контроль загального рівня віброшвидкості в діапазоні від 10 до 1000 Гц; формування попереджувальних (12,7 мм/с) і аварійних сигналів (25,4 мм/с) для системи керування агрегатом; підключення за допомогою комутатора до вібродіагностичної системи одного з агрегатів КС, що забезпечує світлову й звукову сигналізацію [2].

Програмні засоби включають керуючу програму й підпрограми: введення сигналів у ПК; візуального контролю вібраційного сигналу; обчислення спектрів; для графічного відображення спектрів на моніторі; обчислення вібродіагностичних ознак і визначення дефектів вузлів ГПА; керування введенням бази даних вібродіагностичних параметрів. Діагностування здійснюється дистанційно, у тому числі через телефонний зв'язок, комп'ютерні мережі, інтернет.

Накопичений досвід експлуатації систем віброконтролю й вібродіагностування ГТН-25 дозволив внести корективи в технічну документацію з метою застосування даної вібрострої для ГПА-16. Замість 14 каналів залишено вісім. Змінено параметри схем усереднення й схеми порівняння функціональних блоків тощо. Прилад СПВК-8 укомплектований віброперетворювачами 1ПА-26, підсилювачем заряду УЗ-6-2. Встановлені сигнали попередження й аварійної зупинки у разі досягненні вібраційним сигналом заданих значень (25 й 35 мм/с). Розроблено програмне забезпечення системи діагностики.

Для ГПА типу ГТ-750-6 розроблена стационарна система віброконтролю й вібродіагностування СПВК-8 за структурою, аналогічно ГПА-16, але зі зміненими технічними параметрами. Встановлені сигнали попередження й аварійної зупинки в межах 7,1 та 11,2 мм/с. Використовується програмне забезпечення для обробки результатів вібровимірювань, як і для переносного пристрою СВиК-60.

Уперше розроблена стационарна система СПВК-3 для віброконтролю й вібродіагностування основних вузлів КУ АГНКС, яка забезпечує безперервний контроль вібрації у двох точках корпусу

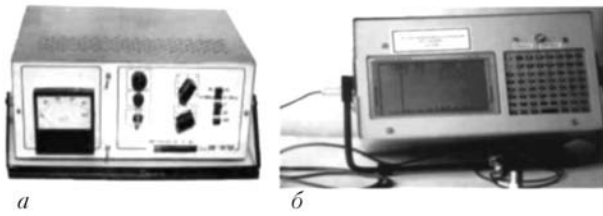


Рис. 2. Аналізатор вібрації АВ-ЕГПА та пристрій АСОК для вібродіагностування КУ АГНКС

КУ у вертикальному й поперечному напрямках. Передбачено третій канал періодичного контролю, за допомогою якого здійснюється віброконтроль у характерних точках КУ. Частотний діапазон 5...1000 Гц. Діапазон контролю віброшвидкості 1...60 мм/с. Забезпечується індикація середньоквадратичного значення віброшвидкості, світлова й звукова сигналізація після досягнення граничних значень (7 й 11,2 мм/с). Комплектується трьома віброперетворювачами типу 1ПА-26 і підсилювачами заряду ВН 1089.

Разом з об'єднанням «Бінар» Арзамас-16 (Росія) розроблено стаціонарний багатоканальний аналізатор спектрів вібрації «Пульсар-В» на базі спеціалізованої ЕОМ для газомоторного компресора (ГМК) типу 10ГКН. У нього ввійшли вісім блоків з 24-ма віброперетворювачами (блок із трьома віброперетворювачами типу 1ПА-26, орієнтованими по осях X, Y, Z); вісім блоків з 24-ма попередніми підсилювачами; блок електроніки, що обробляє сигнал по трьох координатах X, Y, Z; оперативно-запам'ятовувальний пристрій і центральний процесор із засобами зв'язку; блок сигналізації й індикації на базі ПК; блоки живлення. Всі блоки, що входять до складу аналізатора, представлені у вибухобезпечному виконанні для експлуатації в приміщенні класу В1-А. Математична обробка полягає в обчисленні швидкого перетворення Фур'є. Програмне забезпечення аналізатора вібрації включає дві функціональні частини: програму-монітор керування блоком електроніки та пакет програм користувача на ПК. У керуючий ПК закладені програми діагностування шатунних підшипників, ЦПГ (силова частина). Частотний діапазон вимірювань від 5 до 10000 Гц — віброприскорення, від 5 до 1000 Гц — віброшвидкість, від 10 до 500 Гц — вібропереміщення.

Стаціонарні системи СПВК-3, СПВК-8, СПВК-14 пройшли метрологічну атестацію, допущені до застосування в якості робочого засобу вимірювань, а також витримали приймальні випробування.

Уперше розроблені переносні технічні засоби й програмне забезпечення для вібродіагностування основних вузлів ГПА і КУ. Для ЕГПА типу СТД-4000 розроблено аналізатор вібрації АВ-ЕГПА (рис. 2, а), що дозволяє контролювати вібрацію в дев'яти низькочастотних (2...500 Гц) і в шести високочастотних діапазонах (5000...20000 Гц) [3].

Переносна автоматизована система збору й обробки даних вібродіагностування основних вузлів КУ АГНКС (АСОК) (рис. 2, б) з програмним забезпеченням для п'яти типів КУ розроблена на базі мікропроцесорної техніки, що дозволяє виз-

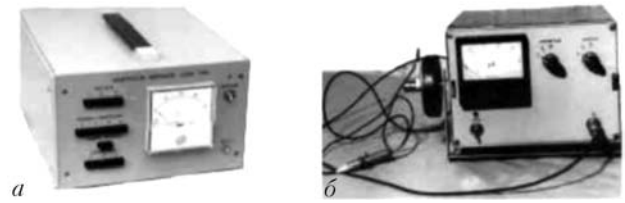


Рис. 3. Удосконалені прилади СВІК-ГМК

начати існуючі дефекти не виходячи із цеху. Система підключається до ПК для обміну інформацією й повним діагностичним аналізом. Діагностичний прилад являє собою мікропроцесорний пристрій, що містить мікропроцесор, оперативний запам'ятовувальний пристрій, зовнішній запам'ятовувальний пристрій, аналого-цифровий перетворювач, електронний атенуатор, підсилювач, віброперетворювач. Система вібродіагностування дозволяє оперативно виконати знімання й аналіз більше 100 параметрів з КУ. Основні дефекти вузлів КУ роздруковуються в автоматичному режимі на рідкокристалічному дисплеї. Порядок вимірювань параметрів й алгоритми обробки сигналів визначаються програмою. Оперативний контроль амплітуди здійснюється в діапазоні 1...15000 Гц [4].

Раніше розроблений прилад СВІК-ГМК для вібродіагностування шатунних підшипників (ШП) в десяти діапазонах (300...2500 Гц), удосконалений для вібродіагностування ШП ГМК 10 ГКН у трьох діапазонах (250...1500 Гц) із застосуванням двох режимів діагностування: з фазовою селекцією й частотною фільтрацією; із частотною фільтрацією без фазової селекції (рис. 3, а). Надалі СВІК-ГМК зазнає істотних змін. Контроль вібрації здійснюється в трьох діапазонах від 180 до 1200 Гц без фазової селекції (рис. 3, б) [5].

Для обробки результатів вібровимірювань приладом СВІК-ГМК розроблено програмне забезпечення.

Уперше розроблені технічні засоби й програмне забезпечення для вібродіагностування шатунних підшипником ГМК МК8, ДР12, Z-330 на базі СВІК-ГМК.

Для агрегатів ГТ-750-6 і ГТК-10 розроблено вібродіагностичний комплекс, у який входять: удосконалені переносні прилади спектрального вібраційного контролю СВІК-60 (рис. 4, а) і СВІК-100 (рис. 4, б); методики експрес-оцінки технічного стану за частотними складовими спектра вібрації; канали зв'язку-компресорні станції-інформаційно-обчислювальний центр; програмне забезпечення для обробки на ПК результатів виміру. СВІК-60 дозволяє вимірювати рівень віброшвидкості в де-

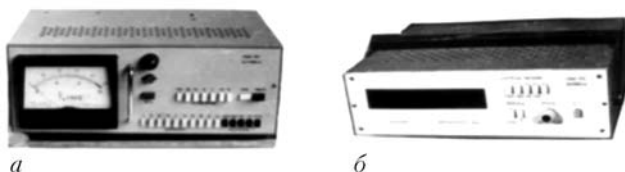


Рис. 4. Технічні засоби для діагностування ГПА типу ГТ-750-6 та ГТК-10

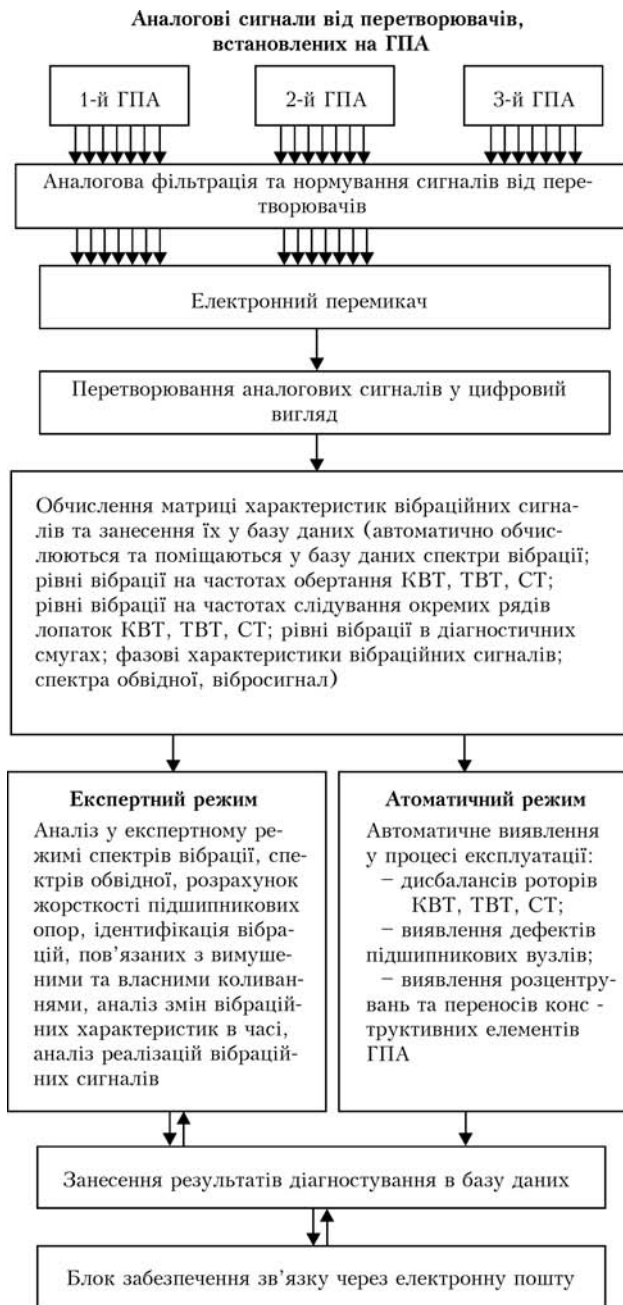


Рис. 5. Блок-схема алгоритму вібраційного діагностування ТПК ГТН-25

сятьох заданих діапазонах частот від 18 до 300 Гц. СВіК-100 дозволяє вимірювати рівень віброшвидкості в дев'ятих діапазонах від 17 до 300 Гц.

Програмне забезпечення призначене для автоматизованого аналізу технічного стану агрегатів. Після видачі результатів діагностування агрегату інформація в автоматичному режимі відправляється на компресорну станцію [6].

Засоби вимірювань пройшли метрологічну атестацію.

Розроблено нові технології для стаціонарного віброконтролю й вібродіагностування основних вузлів ГПА ГТН-25, ГПА-16, ГТ-750-6 і п'яти типів КУ АГНКС.

Як приклад, на рис. 5 представлена блок-схема алгоритму вібраційного діагностування ГПА ГТН-25. В експлуатаційних умовах система віброкон-

тролю й вібродіагностики ГТН-25 знаходиться постійно в робочому стані. Після включення автоматичного режиму система автоматично опитує послідовно всі 14 каналів і по кожному з них визначає спектральні характеристики, виводить на екран основні вібраційні характеристики ГПА ГТН-25 і результати діагностування [2].

ЕГПА типу СТД-4000 діагностують згідно з розробленою методикою під час виводу в ремонт і після ремонту. А у процесі експлуатації контрольні обстеження проводять через 800...1000 год роботи. Після ремонту віброобстеження проводять через 150...200 год з метою оцінки якості проведеного ремонту, виявлення дефектів, не усунутих під час ремонту. Результати діагностування зберігаються протягом усього міжремонтного періоду. За допомогою програмного забезпечення діагностуються наступні дефекти: руйнування вкладишів підшипників нагнітача; збільшені зазори в підшипниках нагнітача; дисбаланси роторів нагнітача та електродвигуна; дисбаланс (биття) ведучої та веденої шестерні редуктора; дисбаланс муфти валів нагнітача й редуктора та електродвигуна й редуктора; заклинювання муфти нагнітача; неспіввісності валів колеса редуктора з валом електродвигуна більше 0,3 мм та вал-шестерні редуктора з валом ротора нагнітача більше 0,02 мм; перекося осей вала колеса редуктора й вала електродвигуна більше 0,6 мм на довжині 1000 мм, вал-шестерні редуктора й вала ротора нагнітача; підвищена вібрація лопатей вентилятора електродвигуна; ексцентричне розташування ротора в розточених статора в районі першого підшипника; ослаблення жорсткості переднього підшипника електродвигуна в поперечному напрямку, а також в разі відсутності.

Істотні особливості мають уперше розроблені методики експрес-оцінки технічного стану ШП, ЦПГ (силова частина) і ТК ГМК 10ГКН. Діагностують ГМК через кожні 100 год, а також залежно від конкретних виробничих умов. Вимірювання віброприскорення виконується приладом СВіК-ГМК. Отримані залежності рівнів вібрації шатунних підшипників від напрацювання дозволяють прогнозувати їх технічний стан з достовірністю 95 %.

Для ГМК 10ГКН розроблені методика діагностування газопускних клапанів, а для ГМК МК 8, ДР12 й Z330 – технологія вібродіагностування ШП і ЦПГ.

Технологія вібродіагностування для п'яти типів КУ АГНКС полягає в знятті вібродіагностичної інформації про стан вузлів у характерних точках, автоматизованої обробки безпосередньо на АГНКС з видачею результатів діагностування на екран рідкокристалічного індикатора. Для детального аналізу використовують ПК. У КУ 2ГМ4-1,3/12-250 діагностуються наступні дефекти: збільшені зазори в сполученнях циліндр – поршень 1–4 ступенів стиснення (2300...2500, 2500...2800 Гц); руйнування компресорних кілець і зношування робочих поверхонь циліндрів і поршня 1-го ступеня стиснення (1500...2800 Гц), 2-го ступеня стиснення (1500...3000 Гц), 3-го ступеня стиснення (800...2100 Гц), 4-го ступеня стиснення (1000...2500 Гц); збільшені зазори, або руйнування



поверхонь тертя шатунних підшипників (1100... 1300 Гц); зношування роликів у корінних підшипниках (1700... 1950 Гц); дефекти в роликів підшипниках (55, 221, 441, 443, 553, 882, 1107 Гц); невірноваженість ротора електродвигуна (12,3 Гц).

Результати вібродіагностування основних вузлів ГПА типів ГТН-25, ГПА-16, ГТ-750-6, ГТК-10, ЕГ-ПА STD-4000, ГМК типу 10 ГКН, МК8, ДР12, Z330 і п'яти типів КУ АГНКС в умовах експлуатації показали високу ефективність і надійність розроблених засобів.

Методики та технології діагностування основних вузлів ГПА та КУ пройшли приймальні випробування і впроваджені на КС і АГНКС.

Проведені дослідження та отримані результати, втілені в ДСТУ, СОУ й регламенти НАК «Нафтогаз України» з віброконтролю та вібродіагностики, а також дозволили сформулювати і реалізувати концептуальні положення комплексного діагностування енергомеханічного і технологічного обладнання КС і АГНКС [7-8], які стали основою створеної галузевої системи діагностики в газовій промисловості України зі структурними підрозділами: НВЦ «Техдіагаз», експертно-аналітичний центр технічної діагностики НАК «Нафтогаз України», технічний комітет України зі стандартизації «Газ природний» ТК-133, в організаційну структуру якого входить підкомітет «Газ природний». Діагностика газотранспортної системи галузі.

Висновки

У результаті виконаних теоретичних й експериментальних досліджень вирішена важлива науково-практична та народно-господарська проблема забезпечення надійності функціонування різнотипного парку ГПА на КС і КУ на АГНКС газової галузі України шляхом створення нових стаціонарних і переносних систем, апаратних і програмних засобів, технологій і методик, нормативних актів з віброконтролю та вібродіагностування енергомеханічного і технологічного обладнання, які дозволили з високою точністю та надійністю без зупинки й розбирання оцінювати технічний стан основних вузлів агрегатів, а також сформулювати та реалізувати положення галузевої системи комплексного діагностування.

Отримані результати можуть бути використані також науковими, конструкторськими організаціями та у навчальному процесі вузів України.

Розроблені технології та технічні засоби віброконтролю й вібродіагностування впроваджені на КС ДК «Укртрансгаз», ДК «Укргазвидобування», ВАТ «Укрнафта» (Гнединському, Качанівському, Глинському газопереробних заводах), ВО «Західтрансгаз», ВО «Мострансгаз», ВО «Лентрансгаз», ВО «Кавказтрансгаз», ВО «Каспморнафтогаз», ПО «Сахалінморнафтогаз» та на АГНКС ВП «Укравтогазу».

Економічний ефект тільки за період з 1996 р. по 2004 р. склав 2,511 млн. грн.

Изложены методы и представлены разработанные стационарные и переносные приборы виброконтроля и вибро-

диагностирования газоперекачивающих агрегатов (с газотурбинным, электроприводом, поршневым приводом) и компрессорных установок (пяти типов отечественного и зарубежного производства) газотранспортной системы Украины.

Впервые приведены целенаправленные комплексные экспериментальные исследования в эксплуатационных условиях КС и АГНКС, на одноцилиндровом отсеке ГМК 10ГКН (ВНИИГаз) и теоретические исследования, которые позволили получить следующие новые результаты:

получены зависимости уровней вибрации в характерных диапазонах частот от наработки, мощности, технического состояния основных узлов ГПА и КУ;

установлены допустимые уровни вибрации в различных частотных полосах для формирования предупредительных и аварийных сигналов и для определения характерных дефектов основных узлов ГПА и КУ;

выбрана величина временной задержки для формирования предупредительных и аварийных сигналов стационарных систем виброконтроля. Сформулированы требования к характеристикам вибропреобразователей, обеспечивающих надежность систем виброконтроля;

определены спектральные и ударные характеристики силового взаимодействия в подшипниковых узлах и ЦПГ ГМК, КУ, а также их интенсивность и время действия, вибрационные параметры ТК ГМК 10 ГКН. Впервые в эксплуатационных условиях зафиксирован прихват силового поршня;

в качестве новых диагностических признаков впервые предложены: частоты собственных и вынужденных колебаний узлов в зависимости от изменения режима работы; амплитуды поступательных и малых угловых колебаний в выбранном направлении, а также фазовых сдвигов; жесткость подшипниковых опор; импульсный сигнал, который строго фиксирован на временной оси, при стабильной частоте вращения для определения разрушения антифрикционного слоя вкладыша подшипника, характерного для роторных машин; вибрационные сигналы, исходящие от двух подшипников, расположенных на одной шатунной шейке коленчатого вала; величины углов между плоскостью движения шатуна и векторами максимальной амплитуды вибрации; измерение в едином масштабе времени вибрационных перемещений всех подшипников роторов; вибрационные параметры для определения расцентровки между валами нагнетателя, редуктора и зубчатых муфт.

Разработаны стационарные и переносные системы виброконтроля и вибродиагностирования, которые позволяют определять дефекты основных узлов работающих агрегатов на ранней стадии их возникновения, останавливать ГПА и КУ для ремонта только при условии действительной необходимости с учетом технической и экономической целесообразности — по фактическому состоянию, прогнозировать и рационально вырабатывать остаточный ресурс, предупреждать аварийные ситуации, снижать объемы ремонтов и профилактических осмотров, оценивать качество ремонтных работ.

Создан ряд основополагающих отраслевых нормативных актов по диагностике. Технологии и технические средства для виброконтроля и вибродиагностирования ГПА и КУ выдержали приемочные испытания и внедрены на КС и АГНКС НАК «Нефтегаз Украины», защищены авторскими свидетельствами, патентами Украины и России.

1. Сапрыкин С. О. Нові технічні рішення УкрНДІгазу щодо забезпечення надійності газотранспортної системи АТ «Укргазпром» // Нафт. і газ. пром-сть. — 1998. — С. 36–41.
2. Бойко М. В. Система аварийної захисти по вібраційному стану вузлів ГПА ГТН-25 / М. В. Бойко, О. Ф. Поліщук, С. А. Сапрыкин, В. Г. Соляник // Там же. — 1992. — № 4. — С. 41.
3. Сапрыкин С. А. Методы и средства для вибродиагностирования электроприводных газоперекачивающих агрегатов / Питання розв. газової пром-сті України: 36. наук. пр.



- // УкрНДГаз. — Харків, 2004. — Вип. XXXI. — С. 106–111.
4. Сапрын С. О. Віброконтроль та моніторинг технічного стану компресорних установок АГНКС // Теж саме. — 2004. — Вип. XXXII. — С. 302–308.
 5. Сапрын С. А. Методологические основы и базовые технологии диагностирования основных узлов газомотокомпрессоров // Теж саме. — 2002. — Вип. XXX. — С. 166–173.
 6. Система контроля и диагностики вибрационного состояния ГПА / М. Е. Бесклетный, Е. А. Игуменцев, М. В. Бойко, Е.И. Душкин, С. А. Сапрын // Газ. пром-сть. — 1987. — № 10. — С. 30–32.
 7. Розгонюк В. В., Сапрын С. А., Бойко М. В. Отраслевая концепция комплексного диагностирования энергомеханического и технологического оборудования в АО «Укргазпром» // Мат. 8-й Междунар. деловой встречи «Диагностика 98». Сочи, апрель 1998. — Т. 1. — С. 119–124.
 8. Сапрын С. О. Перші кроки по створенню єдиної системи діагностичного обслуговування енергомеханічного і технологічного обладнання // Питання розвитку газ. пром-сті України: Зб. наук. пр. — Харків, 2000. — Вип. XXVIII. — С. 94–97.

УКРДГаз,
Харків

Надійшла до редакції
20.03.2006

НОВЫЕ КНИГИ

Троицкий В. А. Краткое пособие по контролю качества сварных соединений. — Киев: Феникс, 2006. — 320 с.



В пособии рассмотрены методы неразрушающего контроля (НК) и их классификация, изложены основные понятия и физические основы, приведены технические характеристики основных видов оборудования и вспомогательных средств для визуальной, ультразвуковой, радиационной, магнитной, капиллярной дефектоскопии и контроля герметичности. Классифицированы основные типы дефектов сварных соединений, выполненных дугowymi, контактными и другими видами сварки. Изложены вопросы статистической обработки результатов контроля, управления качеством сварки, примеры ведомственных норм на дефектность сварных соединений.

Приведены примеры использования средств НК в трубопроводном транспорте, в нефтегазовой и строительной промышленности, при производстве труб магистральных трубопроводов.

Методические рекомендации рассчитаны на инженерно-технических работников, дефектоскопистов и могут быть полезны студентам вузов. Издание третье, дополненное.

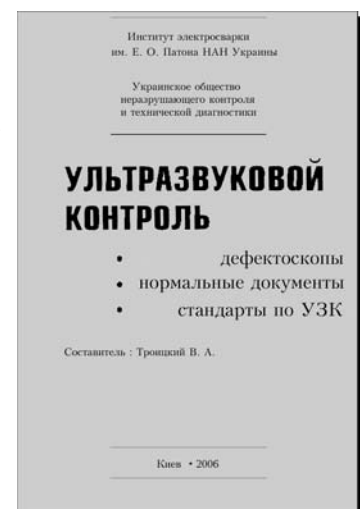
Ультразвуковой контроль: дефектоскопы, нормативные документы, стандарты по УЗК / Составитель В. А. Троицкий. — Киев: Феникс, 2006. — С. 240.

Справочное пособие, содержащее сравнительный анализ современных ультразвуковых дефектоскопов, нормативные документы и стандарты по этому виду неразрушающего контроля качества.

Предназначено для инженеров, занимающихся контролем качества, диагностикой энергетического и другого ответственного оборудования. Дополняет учебно-методический материал, изложенный в книге В. А. Троицкого «Краткое пособие по контролю качества сварных соединений», издание третье, 2006 г.

По вопросам приобретения обращаться:

**03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11, отд. № 4
Тел.: 287-26-66; факс: 289-21-66; e-mail: usndt@ukr.net**





АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ АКУСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПО ВЫЯВЛЕНИЮ ДЕФЕКТНОСТИ КОНТАКТОВ В ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛАХ

Ю. Г. БЕЗЫМЯННЫЙ, О. В. ТАЛКО

На основании анализа физических моделей распространения упругой волны на различных стадиях производства порошковых материалов предложено использовать для оценки дефектности контактов в этих материалах методы измерений относительных изменений коэффициента затухания и скорости распространения упругих волн в зависимости от растяжения–сжатия материала. Экспериментально на примере полидисперсного порошкового железа и модельного эксперимента показана перспективность использования этих методов для решения задач контроля дефектности контактов между исходными частицами порошка при их спекании и спеченного материала.

Based on the analysis of the physical models of elastic wave propagation at different stages of producing powder materials, it has been suggested to apply the methods for measuring relative changes in an attenuation coefficient and elastic wave velocity depending on the tension–compression of a material in order to evaluate defects of contacts in the above materials. The outlook of applying these methods for solving problems on the control over quality of contacts between the initial particles in a powder in their sintering and sintered materials has been demonstrated experimentally by the examples of polydispersed powder iron and a model experiment.

Введение. Порошковая металлургия — одно из перспективных направлений создания современных материалов с наперед заданными свойствами. В связи со сложностью строения порошковых материалов для них характерны большие по сравнению с традиционными материалами разброс свойств и уровень дефектности [1], что предполагает необходимость сплошного контроля качества изделий из них. Формирование структуры и свойств порошковых материалов связано с процессами уплотнения и консолидации исходных компонентов [2], поэтому степень совершенства связей между этими элементами во многом определяет свойства материала. Одной из важных проблем порошковой металлургии, актуальной и сегодня, является разработка эффективных неразрушающих методов численной оценки качества контактов в порошковых материалах [3].

В настоящее время для численной оценки качества контактов в порошковых материалах используют методы, основанные на измерении электропроводимости порошкового тела [2] и скорости распространения упругой волны [3]. Все они связаны с одновременным использованием экспериментальных и рассчитанных в соответствие с той или иной моделью численных характеристик материала. Строгий учет параметров структуры при их модельном представлении возможен далеко не всегда [4], поэтому предложенные количественные оценки дают удовлетворительные результаты только в случаях сравнительно простой структуры и состава пористого тела. Известны [5, 6] чувствительность к процессам структурообразования в порошковых материалах коэффициента затухания и декремента колебаний [7], однако их использование находится на уровне качественного отражения процессов структурообразования. Поэтому

проблему использования акустических методов для выявления дефектности контактообразования порошковых материалов нельзя считать решенной.

Настоящая работа посвящена анализу возможностей использования акустических неразрушающих методов, основанных на прозвучивании материала бегущей упругой волной, для оценки дефектности контактообразования порошковых материалов.

Анализ будем проводить по разработанной нами методике [8], которая в данном случае включает исследование объекта контроля, моделирование задачи для выявления существенных факторов, определяющих ее возможные решения, экспериментальное подтверждение связи контактных явлений в материале с параметрами акустического поля, формулировку основных принципов предлагаемых методов контроля и рекомендации для развития работ в рассматриваемом направлении.

Анализ объекта контроля. Структурные модели. Рассмотрим особенности консолидации порошковых материалов, связанные с контактообразованием и построим структурные модели различных стадий технологического процесса, которые позволяют отобразить основные закономерности формирования акустических полей в таких материалах. Особое внимание будем уделять дефектности контактов. Поскольку свойства порошкового тела формируются преимущественно структурой мезоуровня, то структурные модели материала целесообразно синтезировать именно на этом уровне. Для понимания основных закономерностей формирования акустического поля модели будем строить в предельно упрощенном виде, абстрагируясь от не существенных в каждом случае деталей, но с учетом всех элементов, формирующих свойства материала. Для этого, учитывая, что уп-



ругая волна интегрально отражает свойства материала, по возможности будем отображать его элементы структуры эквивалентными однородными средами, которые имеют те же эффективные свойства, что и репрезентативный объем этих элементов структуры.

Контакты между элементами порошкового материала формируются постепенно в течение технологического процесса его создания [1]. Так, на стадии свободно насыпанного порошка [2] еще не существует консолидированного твердого тела. Каждая частица представляет собой отдельное упругое твердое тело, которое соприкасается с определенным количеством соседних частиц. Количество контактов (координационное число), т. е. количество соприкосновений частицы с соседними, определяется плотностью упаковки. Установившиеся контакты в такой среде отсутствуют, и, следовательно, отсутствуют дефекты в контактах. Поэтому такую среду с точки зрения дефектности контактообразования мы рассматривать не будем.

На стадии прессования [1] между элементами формируются механические связи — несовершенные в смысле упругости контакты. Эта система остается неравновесной. Появление и развитие механической связи приводит к постепенному уменьшению вязкости системы и появлению слабо выраженной упругости формы. Пористость материала остается на сравнительно высоком уровне и влияет на свойства всей системы. Упрощенную структурную модель материала на этой стадии удобно описать как трехфазную систему (рис. 1, *а*). Первая фаза представляет собой вязкую однородную матрицу, внутри которой равномерно расположены упругие сферические частицы исходного порошка одинаковых размеров и сферические поры тоже одинаковых размеров. Дефектность контактов в такой модели будет отражаться вязкой фазой. В предельном идеализированном случае при полном отсутствии контактного взаимодействия между частицами вязкая фаза вырождается в воздушную среду, т. е. сливается с порами.

В процессе спекания механические (несовершенные) связи между частицами постепенно переходят в химические (совершенные) и система становится равновесной [3]. Качество консолидации спеченных порошковых материалов на этой стадии определяется относительными размерами химических и механических контактов и наличием свободных поверхностей частиц. Такая переходная структура наиболее сложная при моделировании. Упрощенная структурная модель такой системы представляет собой смешанную матричнокаркасную конструкцию (рис. 1, *б*) и отличается от

предыдущей наличием упругих связей между частицами. Эти связи на ранних стадиях спекания можно представить тонкими стержнями, а на поздних — перешейками, соизмеримыми по толщине с размерами частиц. Дефектность контактов в такой модели будет определяться вязкой фазой и относительными размерами упругих переемычек.

Структуру спеченного порошкового материала на мезоуровне можно представить [3] как некий объем, заполненный частицами исходного порошка, соединенными между собой надежными химическими связями и порами. Все контакты характеризуются как геометрически несовершенные, так как охватывают не всю поверхность соприкасающихся частиц, что приводит к сильному искажению физических полей в зоне контактов и, следовательно, нелинейным эффектам. Возможно существование дефектных контактов, в которых механическая связь не трансформировалась в химическую. Пory можно разбить на две группы: изомерные, определяющие физико-механические свойства материала, и двумерные (линзообразные), снижающие эти свойства. В этом смысле двумерные поры можно рассматривать как дефекты структуры. Эти дефекты есть и на стадии спекания, однако, там их роль в дефектности материала существенно меньше. Качество консолидации спеченных порошковых материалов, в которых установились химические связи между частицами, определяется относительными размерами химических контактов по сравнению со свободными поверхностями частиц (геометрическим совершенством) и наличием дефектных контактов.

Упрощенную структурную модель такого материала (рис. 1, *в*) можно представить как матричную основу, внутри которой равномерно распределены поры и дефекты различного характера. Матрица представляет собой квазиоднородную твердую среду из спеченных между собой частиц исходного порошка, в каждом элементарном объеме которого свойства материала статистически одинаковы и соответствуют свойствам исходных частиц. Объемные поры представлены идеализированными сферическими частицами, а плоские поры — дисками, имеющими произвольную ориентацию (в модели произвольность ориентации отражена тремя характерными направлениями дисков). Объемные поры определяют плотность материала, а плоские — его дефектность. В общем случае спеченный материал обладает анизотропией свойств за счет преимущественной ориентации плоских дефектов [1]. В предельном случае при максимальной анизотропии материала для модели (рис. 1, *в*) можно считать, что все плоские дефекты ориентированы перпендикулярно направлению прессования.

Акустическая модель. Рассмотрим тенденции формирования монохроматического поля плоской бегущей упругой волны в предложенных структурных моделях. Для этого примем следующие общие допущения. *Во-первых*, чтобы абстрагироваться от граничных условий изделия, среду рассматриваем как безграничную. *Во-вторых*, считаем справедливым предположение для пористой

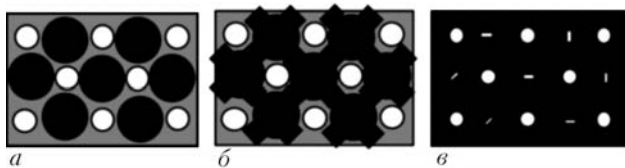


Рис. 1. Структурные модели прессовки (*а*), материала в процессе спекания (*б*), спеченного порошкового материала с дефектными контактами (*в*)



среды, что волновое сопротивление газообразной фазы намного меньше, чем твердой. В этом случае коэффициент прозрачности границы раздела этих фаз равен нулю и упругая волна не проникает из твердой фазы в жидкую. Однако, при существенно малой волновой толщине газообразного слоя коэффициент прохождения через него отличен от нуля и может быть определен известными методами [9]. В-третьих, предположим, что в материале исходных частиц коэффициент затухания упругой волны α незначительно изменяется по ее длине λ : $\lambda\alpha \ll 1$. Это позволяет рассматривать фазу, сформированную частицами исходного порошка, как квазилинейную относительно потерь для бесконечно малых амплитуд упругой волны. В-четвертых, будем считать, что наличие неоднородностей в материале не изменяет направление переноса основной части энергии упругой волны. Это позволяет рассматривать задачу как пространственно одномерную. И, в-пятых, рассмотрим случай малых волновых размеров элементов структуры материала, т. е. будем считать, что для длины упругой волны и наибольших размеров элементов структуры A справедливо соотношение $\lambda \gg A$. Тогда материал, с одной стороны, можно считать статистически однородным и распространение упругой волны в материале можно описывать с позиции механики сплошных сред, а скорость распространения и коэффициент затухания упругой волны, являясь интегральной характеристикой материала по своей сути, будут отражать его эффективные свойства. С другой стороны, параметры упругой волны в этом диапазоне длин волн обладают чувствительностью к эквивалентным параметрам структуры пористого материала [10].

Акустическое поле в рассматриваемых моделях сред будет формироваться параметрами зондирующего сигнала и свойствами элементов прозвучиваемой среды. Параметрами зондирующего сигнала мы можем управлять таким образом, чтобы удовлетворить принятым допущениям. Поскольку структура порошкового материала и свойства его элементов на каждой стадии технологического процесса существенно отличаются, то будут отличаться и закономерности формирования акустического поля. Рассмотрим эти закономерности для каждого случая в связи с возможностью контроля качества контактообразования.

В прессовках (рис. 1, а) наличие трех фаз, существенно отличающихся по своим акустическим свойствам, приводит к значительному искажению распределения смещений на длине упругой волны. Поэтому в акустическом поле будут возникать нелинейные эффекты тем более существенные, чем больше длина волны будет соответствовать размерам структурных элементов. Акустические характеристики такой системы будут определяться вязкой малоупругой фазой, характеризующей качество механических контактов и пористостью. Поэтому в прессовках коэффициент затухания и скорость распространения упругой волны можно использовать для контроля качества механических

контактов и пористости. Причем, акустические характеристики материала будут одновременно реагировать и на изменение пористости и качества контактов.

Процесс уплотнения порошков при прессовании имеет достаточно сложный характер [2]. Он состоит не только в компактировании материала, но и сопровождается консолидацией материала. Известно [1], что пористость служит мерой компактности материала. Мерой консолидации служит качество контактов. Выделить влияние на измеренные параметры каждого из механизмов представляется достаточно сложной задачей. Анализ модели (рис. 1, а) позволяет считать, что качество контактов при прессовании играет, по крайней мере, не меньшую роль в этом процессе. Очевидно, что соотношение между вкладом этих механизмов может существенно меняться в зависимости от свойств порошка, усилия и условий прессования. Поэтому, не выделяя каждый из механизмов, проанализируем общие закономерности изменения рассматриваемых параметров.

Появление и развитие упругой связи между частицами в процессе спекания материала (рис. 1, б) существенно меняет картину формирования акустического поля. В этой системе неоднородность, а следовательно, и отклонение от упругости материала исходных частиц, и нелинейность акустического поля будут определяться размерами перемычек, т. е. относительными размерами совершенных контактов и пористостью. Третья фаза здесь играет несущественную роль. Поэтому коэффициент затухания и скорость распространения упругой волны можно использовать для контроля относительных размеров совершенных контактов и пористости. В такой системе приближение длины волны к размерам структурных элементов может привести к резонансным явлениям в каркасе материала. Как и в предыдущей модели, акустические характеристики материала будут одновременно реагировать и на изменение пористости и качества контактов.

Самым ответственным этапом, с точки зрения контроля дефектности, является последняя стадия спекания материала (рис. 1, в). На этой стадии эффективные скорость распространения и коэффициент затухания упругой волны будут зависеть от свойств матрицы, порового пространства и качества контактов [9]. При этом эффективное значение скорости распространения для любой упругой волны (V_e) как функцию свойств материала и его компонентов удобно искать в мультипликативной, а коэффициента затухания (α_s) — аддитивной форме. Для рассматриваемой модели можем записать

$$V_e = V_0 K_{п} K_{д}, \quad (1)$$

где V_0 — скорость распространения упругой волны в материале матрицы (беспористом); $K_{п}$, $K_{д}$ — коэффициенты, учитывающие пористость и качество контактов между отдельными элементами мезоструктуры.



Формула (1) хорошо согласуется с известной [1] формулой для оценки качества контактов спеченного пористого материала:

$$V_e = V_o(1 - \theta)^m(1 - \theta_d)^k, \quad (2)$$

где θ — изомерная пористость материала; m, k — эмпирические коэффициенты, зависящие от особенностей материала; θ_d — кажущееся увеличение пористости из-за дефектности межчастичных контактов.

Автор [11] критически относится к формуле (2). Следует с ним согласиться по следующим причинам. Эта формула получена по аналогии с методом проводимости. В соответствии с классификацией физических свойств материалов, его электрические свойства описываются тензором второго порядка, тогда как скорость распространения упругих волн определяется характеристиками упругости, которые описываются тензорами четвертого порядка, и скалярным полем массовой плотности. Как известно [4], при определении эффективных свойств композита по свойствам его компонентов не скалярные свойства не подчиняются аддитивному закону. Очевидно, следует пойти дальше и предположить, что свойства, описываемые тензорами более высокого ранга, в том числе и скорость распространения упругой волны, будет иметь более сложную функциональную зависимость от рассматриваемых свойств материала, чем свойство, описываемое тензором второго ранга, в частности, проводимостью. Поэтому использование этой формулы в широком диапазоне пористостей вряд ли имеет смысл. Однако, оценка относительного изменения величины θ_p в процессе роста площадок металлической связи в межчастичных контактах при постоянной $\theta \approx 26\%$ вполне оправдана.

В случае коэффициента затухания упругой волны каждый из рассматриваемых механизмов вносит дополнительное рассеивание энергии упругой волны, традиционно описываемое аддитивно:

$$\alpha_3 = \alpha_o + \alpha_p + \alpha_k, \quad (3)$$

где $\alpha_o, \alpha_p, \alpha_k$ — коэффициенты затухания упругой волны, обусловленные поглощением в матрице, рассеиванием на порах качеством контактов между частицами соответственно.

В формулах (1)–(3) V_o и α_o определяются свойствами исходного порошка. Численные значения величин K_p и α_p были оценены нами в работе [7]. Следует отметить, что увеличение волнового размера элементов структуры до значений $\lambda \approx 10A$ (в некоторых материалах и более), т.е. переход из области релеевского в область стохастического рассеивания приводит к увеличению чувствительности акустического поля к неоднородностям материала [10], сохраняя при этом статистическую однородность самого поля. Необходимый волновой размер можно задать выбором соответствующей частоты зондирующего сигнала.

Оценим величины K_d и α_k . Отметим, что формулы (1) и (3) остаются справедливыми и в случае неспеченного материала (прессовок). На этой

стадии технологического процесса свойства материала, в том числе и акустические, существенно зависят от качества контакта [1]. Экспериментальные данные [1, 3–7, 11] показывают, что у неспеченного или недостаточно спеченного материала величины K_d и α_k могут быть определяющими при формировании V_3 и α_3 . Однако, для спеченного материала на основании данных работы [1] можно сказать, что при сформировавшихся химических контактах между исходными частицами материала влияние величины K_d на V_3 , на порядок меньше, чем K_p . Поскольку дефектность материала рассчитывается с учетом его пористости, то даже небольшая ошибка в оценке влияния последней на эффективное значение скорости распространения упругих волн приведет к существенной погрешности оценки дефектности материала. К аналогичному выводу приводит анализ в соответствии с предложенной нами [7] зависимостью скорости от пористости, в которой малым изменениям пористости соответствуют малые изменения скорости, а большим — большие. В виду малости θ_d по сравнению с θ и величина K_d будет существенно меньше отличаться от единицы, чем K_p .

Для предложенной структурной модели особенности формирования акустического поля при наличии дискообразных дефектов связаны с двумя механизмами: отражением от дефекта и прохождении части энергии упругой волны через воздушный слой. Учитывая независимость (по постановке задачи) вклада каждого дефекта в формирование акустического поля, будем рассматривать каждый дискообразный дефект как отдельный источник неоднородности. Тогда суммарный вклад всех дискообразных дефектов будет определяться их объемным содержанием θ_d . Экспериментальные и теоретические исследования последних лет [12] показали, что амплитуда отраженной полым диском волны при малых волновых размерах диска, как и для сферической поры прямо пропорциональна кубу волнового размера. Поэтому и в случае коэффициента затухания оценку величины α_k можно проводить аналогично α_p .

Учитывая, что размеры дискообразных пор не превосходят размеры сферических, их объемная концентрация существенно меньше, можно и для коэффициента затухания упругой волны сделать вывод аналогичный скорости распространения: вклад α_k в эффективный коэффициент затухания существенно меньше, чем α_p . Если волновая высота диска мала ($< 0,002$ [12]), то через него может проходить часть энергии упругой волны — тогда величина α_k становится еще меньше. Такая ситуация может возникнуть, если механический контакт при спекании не превратился в химический, или при релаксации напряжений в результате упругого последействия возник разрыв химической связи между частицами материала.

Таким образом, в спеченном материале количественная оценка макродефектности материала по скорости распространения и коэффициенту затухания упругой волны существенно осложнена вви-



ду сравнительной слабости эффектов, вызываемых ими при распространении упругой волны.

Для всех трех моделей вопрос численной оценки дефектности контактов с помощью акустических методов сводится к разделению влияния на акустические характеристики материала пористости и дефектности. В известных методах применения скорости распространения упругих волн для контроля одного из этих свойств материала необходимо знать или оценить влияние на скорость другого. Разделение этих двух задач, как уже говорилось выше, далеко не всегда возможно. Полученный результат анализа предполагает использование других по сравнению с существующими методиками подходов при решении поставленной задачи.

Принципиально другой подход состоит в использовании методов контроля, более чувствительных к контактообразованию, чем к пористости. Одно из таких возможных направлений связано с реализацией для порошковых материалов известного [13] способа контроля дефектности материала. В способе используется измерение коэффициента затухания и скорости распространения упругих волн при статическом нагружении материала при разных усилиях в пределах упругости. Использование статического нагружения с небольшими усилиями позволяет, не изменяя общей пористости материала повысить чувствительность акустических параметров к несовершенным контактам за счет усиления проявления нелинейных эффектов, связанных с величиной раскрытия плоского дефекта (особенно с малым раскрытием без нагрузки) и заменой абсолютных измерений относительными.

Следует отметить, что, поскольку исследуемые явления имеют сложный характер, то возможность использования предложенных методов решения требует экспериментального подтверждения.

Экспериментальные исследования. Проверку возможностей акустических методов проводили на полидисперсном порошковом железе и с помощью модельного эксперимента на беспористом образце, позволяющем выделить влияние самого дефекта на акустические свойства материала.

Для исследований контактных явлений в полидисперсном порошковом железе были изготовлены при разных усилиях прессования образцы цилиндрической формы. Экспериментальные измерения скорости распространения продольной упругой волны проводили методом радиоимпульса с дискретной задержкой, а коэффициента затухания — методом импульса сравнения [3] на частоте 0,6 МГц со сквозным прозвучиванием исследуемых образцов материалов по высоте. Методики измерений перечисленных параметров и использованная аппаратура описаны в работе [5].

При измерениях в прессовках порошковых материалов было дополнительно учтено, что они имеют различную жесткость образцов, зависящую от пористости. Поэтому для обеспечения постоянного усилия прижатия преобразователя к поверхности, обеспечения контроля за расстоянием между преобразователями и параллельности их рабочих по-

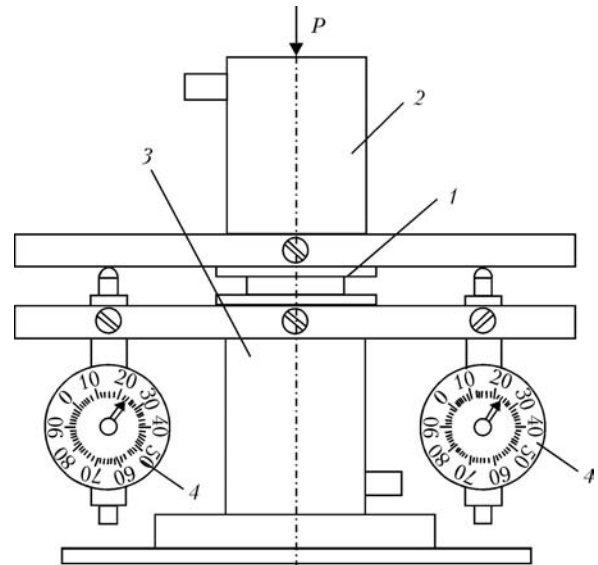


Рис. 2. Акустическая измерительная камера для контроля прессовок с регулировкой статической нагрузки на образец

верхностей разработана оригинальная конструкция акустической измерительной камеры (рис. 2). В этой камере исследуемый образец 1 зажимают между излучающим 2 и приемным 3 электроакустическими преобразователями. Усилие прижима регулировали с помощью груза в пределах 10...50 Н (на рисунке не показан). Толщина образца и параллельность рабочих поверхностей преобразователей контролируется с помощью индикаторов 4 часового типа. На обе плоскости образца наклеена пленка типа «Скотч» толщиной 0,02 мм. Она улучшает акустический контакт образца с преобразователями: липкий слой пленки увеличивает суммарную площадь контакта на границе пленка-образец и позволяет использовать контактную жидкость (воду) на границе преобразователь-пленка, предохраняя пористый материал образца от проникновения в него жидкости.

Результаты измерений скорости распространения и коэффициента затухания упругих волн как функции статической нагрузки в порошковом железе представлены на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что процесс компактирования полидисперсного материала проходит немонотонно. Такая немонотонность характерна для многих физико-механических характеристик порошковых

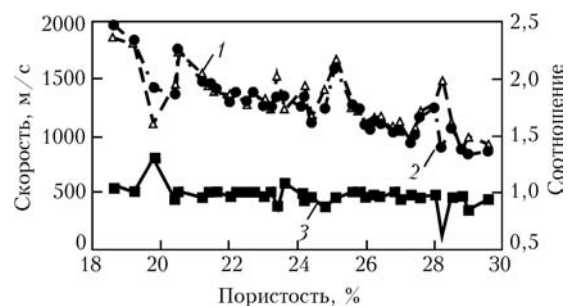


Рис. 3. Экспериментальные зависимости скоростей распространения продольной упругой волны при наибольшей и наименьшей статической нагрузке на образцы прессовок из полидисперсного порошкового железа и отношения этих скоростей от пористости материала: 1 — v_{max} ; 2 — v_{min} ; 3 — v_{min}/v_{max}

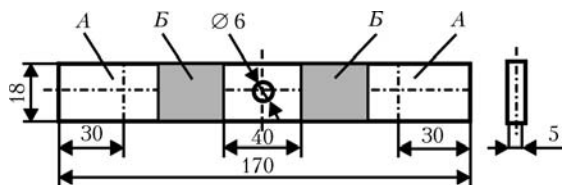


Рис. 4. Образец для измерений скорости распространения и коэффициента затухания упругой волны при статическом и циклическом нагружении

материалов [14–16]. В результате металлографических исследований структуры прессовок полидисперсного порошкового железа этого же состава [17] установлено, что при уплотнении исходного порошка при разных уровнях давлений наблюдаются за счет особенностей контактообразования периодические с шагом пористости порядка 2 % изменения в структуре спрессованного материала. Именно такие периодические возмущения с точностью до указанных значений пористостей наблюдаются и на зависимостях скоростей распространения упругих волн и их соотношений. Причем, для абсолютных значений скоростей распространения упругих волн наблюдается общая тенденция к уменьшению с увеличением пористости, а аномалии скорости, обусловленные контактообразованием, проявляются на фоне этой тенденции. Как и предполагалось при анализе моделей, отношение скоростей не зависит от пористости, но остаются аномалии, обусловленные, надо полагать, контактообразованием. Из этого следует, что предложенный подход позволил разделить механизмы, влияющие на изменение скорости распространения упругих волн, обусловленные уплотнением и контактообразованием.

Дополнительно был проведен модельный эксперимент по выявлению зависимости коэффициента затухания и скорости распространения упругой волны от статической нагрузки при разных степенях дефектности образца. Измерения проводили на образце из алюминиевого сплава Д16чАТ (рис. 4). Литой материал можно рассматривать как идеально спеченный порошковый материал, т. е. беспористый с идеальными контактами. Дефектные контакты в материале моделировалась усталостными трещинами разного раскрытия, развивающимися в результате циклического деформирования образца. Для формирования усталостной трещины в требуемом месте в образец был введен концентратор напряжений в виде сквозного отверстия. Для проведения циклического и статического нагружения образец зажимался на установке Amsler по площадкам А. На площадках В к образцу были приклеены по методике [18], обеспечивающей стабильность акустического контакта в процессе испытаний, стандартные наклонные электроакустические преобразователи на 5 МГц, позволяющие возбуждать в материале упругую волну Лемба симметричного типа. Объем озвучиваемой области составлял примерно 3600 мм³. Образец подвергали циклическому симметричному растяжению – сжатию по методике [19]. Под действием циклической нагрузки в образце от концентратора напряжения в обе стороны развивались

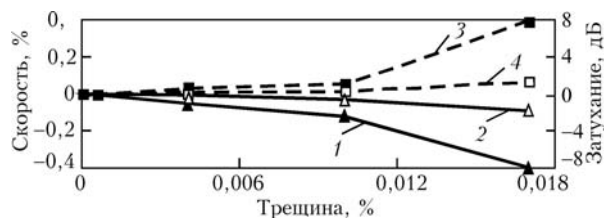


Рис. 5. Зависимости изменения затухания и скорости распространения упругих волн от относительного объема усталостной трещины в образцах из сплава Д16чАТ при статическом растяжении 10 и 40 МПа: 1, 2 – скорость 40 и 10 соответственно; 3, 4 – затухание 40 и 10 соответственно

усталостные трещины, площадью раскрыва ориентированные перпендикулярно приложению нагрузки. Размеры трещины контролировали с поверхностей образца с помощью микроскопа МБС-9. До нагружения в образце были проведены измерения зависимостей скорости распространения и коэффициента затухания упругой волны от статической нагрузки, не превышающей предела упругости материала. Волновые размеры концентратора велики, поэтому он воспринимался акустической волной как макроэлемент и не влиял на измерения относительных значений акустических характеристик материала. Погрешность относительных измерений в данном эксперименте составляла для скорости распространения упругой волны – не более 0,01 %, а для затухания – 0,1 дБ. При различных размерах трещины нагружение образца приостанавливали и проводили повторные измерения скорости распространения и коэффициента затухания упругой волны. Результаты относительных изменений скорости распространения и коэффициента затухания упругой волны от относительного (по сравнению с озвучиваемым объемом материала) размера трещины для двух уровней статического растяжения представлены на рис. 5.

Из рис. 5 видно, что изменения скорости распространения и коэффициента затухания имеют взаимно обратную зависимость и от статического нагружения материала и от размера дефекта. При этом, если скорость на рассмотренных интервалах величин нагрузки и дефекта изменяется несущественно, то коэффициент затухания – более, чем в два раза. Как видно, и в этом случае коэффициент затухания обладает существенно большей чувствительностью, однако, скорость можно измерять с существенно большей точностью.

Проведенные измерения подтвердили чувствительность указанных характеристик к наличию плоских дефектов в материале. Следует отметить, что в реальных порошковых материалах концентрация плоских дефектов на несколько порядков превышает исследованную в эксперименте. Из рис. 5 видно, что изменение обеих акустических характеристик материала резко возрастает при увеличении объемной доли дефекта или уровня нагружения. Поэтому следует предположить, что в реальных порошковых материалах чувствительность их к дефектности материала существенно возрастет. Поскольку всегда можно выбрать такой уровень статического нагружения, чтобы поры не



влияти на изменения акустических характеристик, то, очевидно, и в случае спеченного материала, их относительные изменения позволят отделать задачу контроля контактов от контроля изомерной пористости.

Последний эксперимент носил достаточно условный характер, но принципиально отразил возможность решения задачи и наглядно показал наличие численной связи изменений акустических характеристик с дефектностью спеченного материала при приложении к нему статической нагрузки.

Выводы

В результате анализа физических моделей порошковых материалов на различных стадиях их изготовления выявлены основные закономерности формирования акустических полей в соответствующих случаях. Отмечено, что основной проблемой при контроле дефектности контактообразования с помощью акустических методов является необходимость разделения влияния на акустические характеристики материала процессов компактирования и контактообразования. Предложены оригинальные акустические методы контроля качества контактообразования, основанные на относительных измерениях скорости распространения и коэффициента затухания упругой волны при статическом нагружении материала.

В результате экспериментальной проверки предложенных методов на прессовках из полидисперсного порошкового железа и модельном эксперименте подтверждена возможность использования относительных изменений коэффициента затухания и скорости распространения упругих волн для контроля дефектности контактов на стадии прессования, при спекании материала и в спеченном материале.

Для решения рассматриваемой задачи дальнейшие работы целесообразно вести в направлении получения статистических данных для разработки численных методов оценки качества контактообразования по результатам измерения акустических характеристик материала.

1. *Скорород В. В., Солонин С. М.* Физико-механические основы спекания порошков. — М.: Металлургия, 1984. — 159 с.

2. *Косторнов А. Г.* Материаловедение дисперсных и пористых металлов и сплавов. В 2 т. — Т.1. — Киев: Наук. думка, 2002. — 572 с.
3. *Роман О. В., Скорород В. В., Фридман Г. Р.* Ультразвуковой и резистометрический контроль в порошковой металлургии. — Минск: Вышэйш. шк., 1989. — 182 с.
4. *Скорород В. В.* Теория физических свойств пористых и композиционных материалов и принципы управления их микроструктурой в технологических процессах // Порошк. металлургия. — 1995. — № 1. — С. 53–71.
5. *Безьямный Ю. Г., Вдовиченко А. В., Кузьменко В. А.* Некоторые результаты акустических исследований материалов, изготавливаемых методами порошковой металлургии / Препринт. — Киев: НАН Украины, ИПМ, 1994. — 63 с.
6. *Исследование межчастичных контактов в пористых волоконных материалах из меди на ранних этапах спекания* / А. Г. Косторнов, В. Н. Клименко, Ю. Г. Безьямный, А. Г. Боровик // Порошк. металлургия. — 1999. — № 9–10. — С. 13–17.
7. *Безьямный Ю. Г.* Использование акустических характеристик для контроля структуры пористых материалов // Электронная микроскопия и прочность материалов / Сб. науч. трудов, Киев, 1999. — С. 93–105.
8. *Безьямный Ю. Г.* Возможности акустических методов при контроле структуры и физико-механических свойств пористых материалов // Порошк. металлургия. — 2001. — № 5–6. — С. 23–33.
9. *Неразрушающий контроль и диагностика: Справ.* / Под ред. В. В. Клюева. — М.: Машиностроение, 2003. — 656 с.
10. *Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б.* Ультразвуковые методы в физике твердого тела. — М: Мир, 1972. — 238 с.
11. *Косторнов А. Г.* Материаловедение дисперсных и пористых металлов и сплавов. — В 2 т. — Т.2. — Киев: Наук. думка, 2003. — 552 с.
12. *Ермолов И. Н.* Достижения в теоретических вопросах ультразвуковой дефектоскопии, задачи и перспективы // Дефектоскопия. — 2004. — № 10. — С. 13–48.
13. *А. с. СССР № 1397823.* Способ контроля дефектности изделия / Безьямный Ю. Г. — Б. И. № 19, 1988.
14. *Особенности уплотнения металлических порошков при прессовании* / И. М. Федорченко, А. Е. Кушевский, Т. Ф. Мозоль, В. Ф. Чудовский // Порошк. металлургия. — 1987. — № 3. — С. 13–17.
15. *Дискретная зависимость свойств порошковых сталей от пористости* / В. Н. Анциферов, С. Н. Боброва, С. А. Оглезнева, Ю. И. Рогозин // Перспективные материалы. — 1999. — № 4. — С. 51–57.
16. *Особенности деформации высокопористых металлических материалов* / В. В. Скорород, А. Н. Леонов, С. М. Солонин и др. // Порошк. металлургия. — 2002. — № 5/6. — С. 32–40.
17. *Исследование структуры порошкового железа с различной пористостью методом растровой электронной микроскопии* / А. Е. Кушевский, В. Т. Бондарь, Н. А. Крылова и др. // Там же. — 1990. — № 9. — С. 91–95.
18. *А. с. СССР № 1335866.* Способ контроля качества акустического контакта / Безьямный Ю. Г. — Б. И. № 33, 1987.
19. *Усталостные испытания на высоких частотах нагружения* / Под ред. В. А. Кузьменко. — Киев: Наук. думка, 1979. — 336 с.



НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ТЕРМООБРАБОТКИ ЗВЕНЬЕВ ЦЕПЕЙ МЕТОДОМ МАГНИТНОЙ СТРУКТУРОСКОПИИ

Л. И. ЛУМИРОВСКАЯ, И. Г. СОКОЛИНСКАЯ, А. С. МЯЩИЦЕВА, О. Т. СИМОЧКИНА

Показана эффективность применения метода магнитной структуроскопии для массового неразрушающего контроля качества термообработки звеньев высокопрочных цепей и качества прутка, применяемого для их изготовления.

The paper shows the efficiency of application of magnetic structuroscopy method for massive non-destructive quality testing of heat treatment of high-tensile chains sections and quality of the rod used for their production.

Статистика аварий шахтных скребковых конвейеров показывает, что около 60 % их простоев происходит из-за разрушения круглых и соединительных звеньев тяговых цепей.

Цель настоящей работы — исследование возможности применения неразрушающего метода магнитной структуроскопии для априорной оценки надежности круглозвенных цепей, работающих на скребковых конвейерах в угольных шахтах, а также качества прутков, из которых изготавливаются цепи. Необходимость этой работы обусловлена следующими факторами.

Цепи работают в условиях динамических растягивающих, изгибных и ударных нагрузок, величина и скорость приложения которых колеблются в широких пределах. В то же время Межгосударственный стандарт 25996–97 «Цепи круглозвенные высокопрочные для горного оборудования» [1] в качестве основных механических свойств устанавливает результаты испытаний статическим растяжением — два образца из партии цепей длиной 200 м.

Испытания на усталость, статический и ударный изгиб рекомендуются как факультативные. Они проводятся на трех образцах из пяти партий цепей и их результаты не являются критерием приемки и не могут обеспечить необходимую надежность цепей. Это приводит к частым разрушениям цепей из-за образования в звеньях усталостных трещин и значительно реже — к пластическим деформациям и вязким разрывам.

Не менее важным условием достижения высокой надежности цепей является качество исходного прутка. Исследования разрушенных в эксплуатации звеньев показали, что в ряде случаев причиной этого являются дефекты металлургического происхождения.

Если холоднотянутый прутки не отожжен и обладает пониженной пластичностью, то это приводит к образованию трещин при изготовлении звеньев цепи и ухудшает механические свойства звеньев. В некоторых разрушенных звеньях обнаруживается исходная структура перегрева, которая не исправляется последующей термообра-

боткой при изготовлении цепей, а иногда — большое количество неметаллических включений в исходном металле.

Работу проводили в лаборатории неразрушающего контроля Спеццентра «Углеизотоп» и центральной заводской лаборатории ЗАО «Артемовский машиностроительный завод ВИСТЕК» — изготовителе цепей.

Использовали магнитный структуроскоп СИЛА, разработанный и изготавливаемый СЦ «Углеизотоп» [2]. Исследования проводили на образцах, круглых звеньях и прутках калибра 18 мм из сталей 23Г2А и 25Г2А и калибров 24 и 26 мм из стали 25ХГНМА.

Из четырех партий прутков стали 23Г2А, поставленных Криворожским металлургическим комбинатом, были изготовлены образцы для испытаний на ударный изгиб. Их подвергли закалке с 880 °С и отпуску при температурах 350, 380 и 430 °С. На рис. 1 показаны результаты измерений твердости, сопротивления удару и показаний магнитного структуроскопа СИЛА.

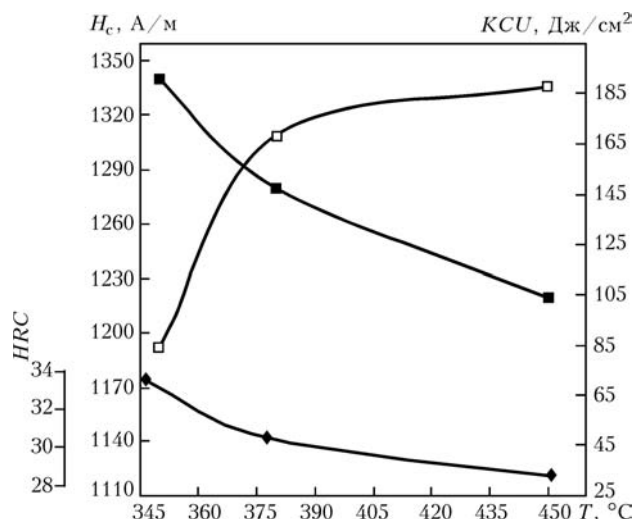


Рис. 1. Зависимость механических свойств HRC и KCU и показаний магнитного структуроскопа H_c от температуры отпуска T образцов из стали 23Г2А

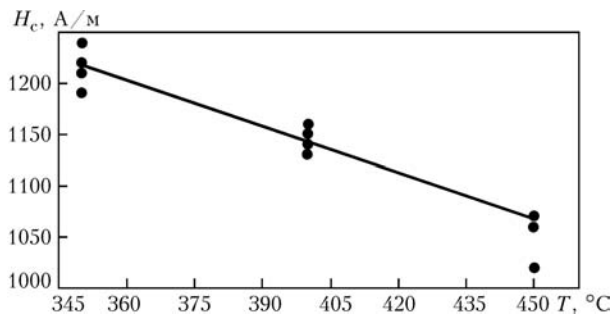


Рис. 2. Зависимость показаний структуроскопа от температуры отпуска T для звеньев из стали 25XГНМА

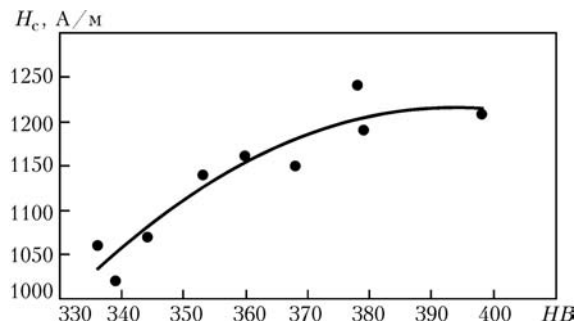


Рис. 3. Зависимость показаний структуроскопа H_c от твердости HB звеньев из стали 25XГНМА

Образцы, отпущенные при 350 °С, имеют ударную вязкость, близкую к нижнему пределу (78 Дж/см²), т. е. попадают в зону риска. По показаниям прибора СИЛА они надежно отделяются от отпущенных при 380 °С, тогда как по твердости разница составляет 2-3 ед. HRC , что близко к погрешности метода измерения твердости.

Еще более убедительными получились результаты на другой партии образцов, термообработанных по заводскому режиму: все образцы, имеющие ударную вязкость ниже нормы, были выделены по показаниям прибора СИЛА.

Термическую обработку звеньев из стали 25XГНМА проводили по заводской технологии: закалка от температуры 880 °С на воду и отпуск при 400 °С 2 ч с замачиванием в воде; часть звеньев после закалки подвергали отпуску при 350 и 450 °С.

Измерения проведены на 105 звеньях, изготовленных из проката разных плавок, поставленного металлургическими заводами «Днепропеталь» и «Криворожсталь». Получены показания структуроскопа СИЛА с разбросом ± 200 А/м в одном отрезке цепи, что, в общем, естественно, так как измерения проводили на цилиндрической поверхности без ее зачистки. На показания, безусловно, влияет окалина, повышая их примерно на 200 А/м. Кроме того, как показали металлографические исследования, у звеньев из разных прутков разная также и глубина обедненного углеродом поверхностного слоя.

Для звеньев из стали 25XГНМА получена хорошая зависимость показаний прибора СИЛА от температуры отпуска звеньев (рис. 2). Уменьшение показаний прибора при повышении температуры отпуска, как известно, связано со снижением структурных напряжений и карбидным превращением в стали, а при увеличении температуры отпуска выше 400 °С — с коагуляцией карбидов.

Проведенные измерения выявили также хорошую связь показаний прибора СИЛА с твердостью, измеренной на зачищенной на глубину до 1 мм цилиндрической поверхности образцов. Коэффициент корреляции — 0,68 (рис. 3). Это вполне приемлемо, если учесть, что звенья изготовлены из проката пяти разных плавок, поставленного разными заводами, проходили термообработку в разные смены и т. д.

Поскольку измерение твердости является косвенным методом оценки прочностных характеристик, это подтверждает возможность применения

магнитной структуроскопии для оценки качества звеньев цепей, что позволит выявить грубые отклонения от нормы.

Из нескольких звеньев, на которых получены показания структуроскопа 810, 830, 1220, 1410, 1440 и 2000 А/м, изготовлены образцы и проведены испытания на ударный изгиб. Результаты: 74, 93, 89, 79, 76 и 64 Дж/см², т. е. для всех испытуемых образцов, кроме одного (810 А/м — 74 Дж/см²), получена четкая связь показаний структуроскопа с ударной вязкостью. Что касается упомянутого образца, то металлографическое исследование показало наличие в его структуре большого количества неметаллических включений, что привело к снижению его разрушения.

Следует отметить, что в этом эксперименте имеется некоторая погрешность, связанная с различием магнитных свойств ударного образца, изготовленного из средней части сечения, и поверхностного слоя звена, из которого он был вырезан. Тем не менее исследования показывают возможность применения неразрушающей магнитной структуроскопии для выделения звеньев, не удовлетворяющих требованиям по ударной вязкости ≥ 78 Дж/см².

Пять звеньев № 1–5 с показаниями прибора СИЛА, А/см: 780, 860, 1000, 1250, 1480 соответственно) были испытаны на статический изгиб. Результаты испытаний в общем согласуются с показаниями прибора: звенья № 2–4 выдержали прогиб 23, 26 и 27 мм соответственно, т. е. удовлетворяют норме, рекомендуемой нормативными документами (20 мм); звено № 1 разрушилось при прогибе 21 мм, т. е. попало в зону риска, но благодаря более высокой пластичности все же выдержало испытание, а звено № 5, оцененное по показаниям прибора как хрупкое, разрушилось при прогибе 17 мм. Хотя нельзя делать выводы по результатам испытаний столь малой выборки, но это дает основания предполагать, что и эту характеристику механических свойств прибором СИЛА можно измерять.

Следует отметить, что всемирно известные фирмы «И. Д. Тайле», «Бекерпрюнте» и др., изготавливающие высокопрочные цепи для тяговых органов скребковых конвейеров, устанавливают температуру отпуска не ниже 400 °С как обеспечивающую ударную вязкость, большую 100 Дж/см², и достаточно высокую деформацию статического изгиба до разрушения. Именно эти характеристики авторы ра-

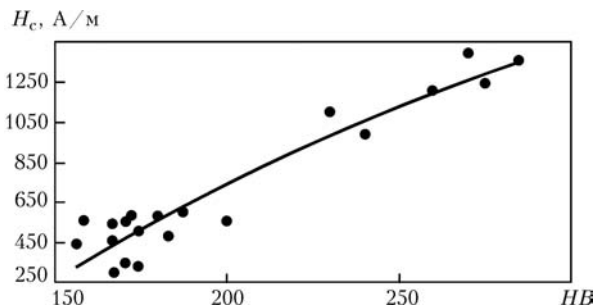


Рис. 4. Зависимость показаний структуроскопа H_c от твердости $HВ$ прутков из стали 25ХГНМА

бот [3, 4] выделяют как основные, обеспечивающие высокую надежность цепей.

Это хорошо согласуется с нашим опытом. Если при статическом растяжении чаще всего разрушаются звенья, на которых показания структуроскопа ниже, чем у других в испытуемом отрезке, то на звеньях цепей, которые преждевременно разрушились при эксплуатации шахтных конвейеров, показания структуроскопа были выше, чем у остальных. Их разрушения носили характер усталостных с образованием сетки трещин и последующим хрупким изломом.

Таким образом, проведенная работа показала, что неразрушающий контроль качества термообработки звеньев с помощью магнитной структуроскопии является информативным методом, позволяющим оценивать как статические, так и динамические механические характеристики звеньев, что особенно важно.

На основании обработки результатов проведенных исследований были установлены границы удовлетворительного качества по показаниям структуроскопа СИЛА для звеньев цепей из сталей 23Г2А, 25Г2А и 25ХГНМА. Внедрение НК на заводе-изготовителе цепей безусловно будет способствовать повышению их качества и снижению аварийности в шахтах.

Следующим этапом работы было исследование возможности отбраковки негодных прутков в состоянии поставки методом неразрушающей магнитной структуроскопии. Это важно, поскольку их структура и механические свойства оказывают существенное влияние на качество звеньев цепей.

Технические условия комбината «Криворожсталь» [5] предписывают изготовление горячекатаного проката из стали 23Г2А, 23ХГА с твердостью не более 217НВ, 25ХГНМА — не более 255НВ; холоднотянутого — в отожженном состоянии из стали 23Г2А, 23ХГА — не более 179 НВ, а из стали 25ХГНМА — не более 207 НВ.

Технические условия на прутки завода «Днепропеталь» [6] предписывают изготовление проката из стали 25ХГНМА в отожженном состоянии с твердостью не более 179 НВ.

В работе проведены измерения магнитной характеристики и твердости 42 образцов, отрезанных

от прутков в состоянии поставки. Результаты показаны на рис. 4.

Металлографическое исследование показало хорошую чувствительность метода магнитной структуроскопии к структуре и твердости образцов. Образцы, на которых получены показания в интервале 300...700 А/м, имеют в структуре зерна феррита и перлита, твердость не выше 187 НВ, что соответствует свойствам отожженных прутков. Образцы, на которых получены показания выше 1400 А/м, имеют структуру неотожженного металла — сорбит и твердость выше 255 НВ.

В процессе исследования удалось также неразрушающим методом обнаружить партию прутков из углеродистой стали. Показания структуроскопа были в пределах 220...350 А/м, тогда как для стали 25ХГНМА характерны показания 350...650 А/м. Этот факт также можно отнести к положительным сторонам метода.

Следует указать, что в процессе работы проведено сравнение возможностей осуществления контроля двумя структуроскопами: коэрцитиметром ИКАР с П-образным датчиком и прибором СИЛА, по сути — тоже коэрцитиметром, но с локальным датчиком. У каждого из них есть свои преимущества. При П-образном датчике происходит глубокое промагничивание и устраняется влияние поверхностного слоя, но в тоже время значительно возрастает влияние зазора между полюсами датчика и криволинейной поверхностью звена или прутка. В результате разброс показаний на одном звене: на приборе ИКАР 9...11 %, на приборе СИЛА 2...4 %. Поэтому для решения поставленной задачи был выбран локальный структуроскоп СИЛА.

Вывод

Показана возможность применения метода магнитной структуроскопии для массового НК качества звеньев цепей, отработана методика контроля, выбраны границы удовлетворительного качества звеньев круглозвенных высокопрочных цепей и внедрен на заводе контроль с помощью магнитного структуроскопа СИЛА звеньев цепей и входной контроль проката.

1. ГОСТ 25996-97. Цепи круглозвенные высокопрочные для горного оборудования (п. 7.3, 7.7).
2. Соколинская И. Г. О возможности прогнозирования и повышения надежности машин и механизмов по результатам магнитной структуроскопии // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — № 2. — 2002. — С. 17-21.
3. Бетхер Ф. Круглозвенные цепи фирмы «И.Д. Тайле» — международный эталон качества. — Ж-л «Глюкауф». — Май 1(2). — 2000.
4. Hochfeste Rundstahlketten für Bergbau. Фирма Becker-Prunte, нормативные материалы.
5. ТУ У 27.1.-4-531-2002. Прокат горячекатаный и холоднотянутый из конструкционной легированной высококачественной стали для высокопрочных сварных цепей.
6. ТУ У 14-2-1249-2000. Прокат для сварных цепей и соединительных звеньев.



ЗАСТОСУВАННЯ КОМПЛЕКСНОГО ПІДХОДУ ДО ВИЗНАЧЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАФТОГАЗОВОГО ОБЛАДНАННЯ

М. О. КАРПАШ, І. С. КІСІЛЬ, О. М. КАРПАШ, І. А. МОЛОДЕЦЬКИЙ

Розглянуто використання методу сумісного вимірювання кількох параметрів (теплопровідної характеристики і твердості) для визначення фізико-механічних характеристик матеріалу металоконструкцій в нафтогазовій галузі. Наведено результати порівняльних досліджень щодо встановлення характеру залежності різних параметрів неруйнівного контролю (включаючи теплопровідну характеристику та твердість) від межі текучості матеріалу насосно-компресорних труб.

The problems of usage of the combined measurement method of several material parameters set (hardness and thermal conductive parameter) for evaluation of mechanical properties of metalwork material. The results of comparative investigations on establishment of dependence between several non-destructive parameters (including hardness and thermal conductive parameter) and yield strength of the lifting pipe material are given.

Питання визначення фізико-механічних характеристик (ФМХ) труб нафтового сортаменту є важливим з огляду на їх вартість, що складає до 30 % вартості всього встановленого на свердловині [1] обладнання та потенційну небезпеку у випадку їх поломки чи відмови. Для правильного компонування насосно-компресорної колони необхідно забезпечити відповідність ФМХ кожної труби встановленим вимогам. На даний час визначення цих характеристик труб не здійснюється, а існуючі спеціалізовані прилади [2] забезпечують тільки їх розбракування по групам міцності. В залежності від границі текучості матеріалу труби нафтового сортаменту поділяють на групи міцності Д, К, Е, Л, М, Р, Т [3]. Для труб нафтового сортаменту основною фізико-механічною характеристикою є границя текучості їх матеріалу, тому в подальшому розглядатиметься саме вона.

Попередньо авторами [4, 5] запропонований новий підхід до визначення ФМХ сталей, який ґрунтується на комплексному врахуванні кількох параметрів (твердості, теплопровідності, питомого електричного опору) неруйнівного контролю (НК) із застосуванням нейронних мереж. Питомий електричний опір було вирішено виключити з розгляду через труднощі, пов'язані із точними вимірюваннями цього параметра для феромагнітних сталей в умовах експлуатації металоконструкцій. Для експериментальної перевірки отриманих теоретичних положень розроблено та виготовлено спеціалізований прилад [6]. Він забезпечує реєстрацію зміни температурного поля на поверхні об'єкта контролю (із дискретністю 1 с) при одночасному нагріві джерелом, вимірювання твердості — за допомогою серійного твердоміра типу ТДМ-1, а також в приладі передбачена можливість реалізації алгоритму обробки результатів вимірювань за допомогою штучних нейронних мереж. Вимірювання здійснюються за допомогою лінійки шести напівпровідникових терморезистивних давачів (точність

$\pm 0,25$ °С в діапазоні температур 20...100 °С). Як джерело інтенсивного нагріву використовується керамічний інфрачервоний нагрівач виробництва фірми Salamander [7]. Переваги використовуваного нагрівача: високий коефіцієнт корисної дії (до 96 %), потужність в 1000 Вт, безконтактність нагріву, невеликі розміри (в корпусі — 280×110×120 мм), швидкий вихід на робочий режим нагріву (до 5 хв). В ході попередніх досліджень виділено інформативний параметр — площа чотирикутника, утвореного внаслідок певної побудови на графічному представленні залежності зміни температури від часу (далі — теплопровідна характеристика). Цей параметр вимірюється з допомогою розробленого технічного засобу.

Метою даної роботи є порівняльні випробування відомих методів визначення ФМХ металоконструкцій та пропонованого, а також встановлення характеру залежності між інформативними параметрами та ФМХ насосно-компресорних труб.

Методика проведення експериментальних досліджень полягала в наступному. Відібрано 13 зразків із насосно-компресорних труб із попередньо визначеними в заводських лабораторіях ФМХ згідно ГОСТ 10006–80. Діапазон вказаних значень границі текучості відібраних зразків — 320...760 МПа (табл. 1, графа 2). Товщина стінки усіх зразків — 5,5 мм, діаметр — 73 мм.

Для порівняльного аналізу було вирішено проводити вимірювання з використанням наступних технічних засобів: твердоміра динамічного типу ТДМ-1 (зав. № 690, НВФ «Ультракон-Сервіс», м. Київ) — рис. 1, а); коерцитиметра КРМ-ЦК (зав. № 3006, НВФ «Спеціальні Наукові Розробки», м. Харків) — рис. 1, б); прилад для визначення ФМХ труб нафтового сортаменту СІГМА-Т10.1 (НВФ «Зонд», м. Івано-Франківськ) — рис. 1, в); розроблений прилад ФМХ-1 — рис. 1, г).

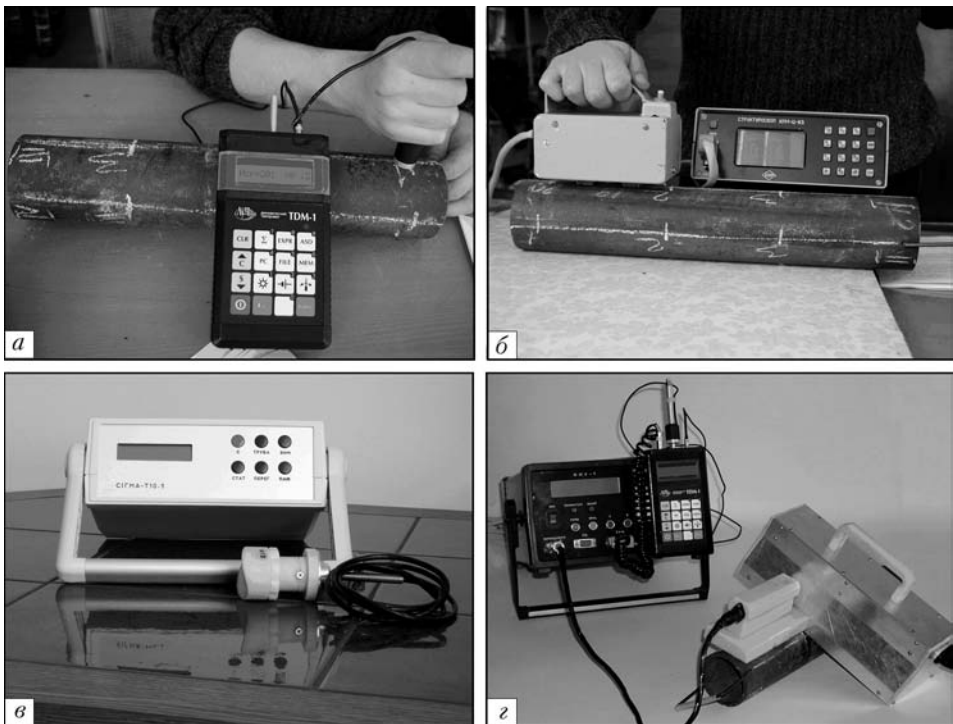


Рис. 1. Технічні засоби, що були використані в ході досліджень

Таблиця 1. Результати досліджень

Номер зразка	Границя текучості σ_T , МПа	Твердість по шкалі Брінеля $HВ$	Коерцитивна сила H_c , А/м	Покази приладу СИГМА-Т10.1 S , МПа	Техно-провідна характеристика M , ум. од. $\cdot 10^{-3}$
1	320	169,5	2,59	571,8	31,86
2	470	219,4	7,46	559,6	29,90
3	490	201,3	5,86	574,8	30,58
4	581	203,1	8,43	574,7	31,10
5	588	206,8	7,76	568,9	29,44
6	600	211,1	9,28	656,6	29,78
7	600	227,5	6,73	616,9	31,00
8	610	199,1	9,64	564,2	29,17
9	629	226,6	12,50	590,8	30,80
10	668	237,7	10,85	662,3	27,68
11	682	240,3	7,49	671,5	26,52
12	700	261,8	8,34	633,5	29,20
13	760	270,0	7,36	622,3	27,29

Таблиця 2. Коефіцієнти кореляції

	$HВ$	H_c	S	M	σ_T
$HВ$	1	0,388	0,607	-0,685	0,857
H_c		1	0,267	-0,287	0,624
S			1	-0,639	0,608
M				1	-0,721
σ_T					1

Для зменшення впливу різних факторів (анізотропії матеріалу зразків, шорсткості поверхні та ін.) на результати вимірювань кожен зразок був розмічений на 12 точок (на перетині чотирьох твірних та трьох поперечних січень). В кожній точці виконано п'ятикратні вимірювання всіма

приладами, вказаними вище. Вимірювання проводили в однакових лабораторних умовах.

Осереднені результати вимірювань представлені в табл. 1.

Таблиця значень коефіцієнтів кореляції між вимірними параметрами (твердістю $HВ$, коерцитивною силою H_c , показами приладу СИГМА-Т10.1 S , показами приладу ФМХ-1 M) та границею текучості σ_T приведені в табл. 2.

З табл. 2 видно, що кращі коефіцієнти кореляції з границею текучості є для твердості та теплопровідної характеристики. Знак мінус для теплопровідної характеристики вказує на обернено пропорційну залежність цього параметра від границі текучості. Загалом коефіцієнти кореляції не досягають високих значень (більше 0,9), що може вказувати на не лінійність взаємозв'язків

між даними параметрами НК та границею текучості та на необхідність врахування кількох параметрів одночасно. Тим більше, кореляційний аналіз дає можливість встановити тільки наявність чи відсутність залежності між досліджуваними параметрами, а не оцінити її характер.

Тому метою подальших досліджень було встановлення оптимальної комбінації вимірюваних параметрів, яка б забезпечувала найбільш точне визначення границі текучості. Для вирішення цієї задачі використано алгоритми штучних нейронних мереж [8]. Нейронна мережа заданої будови тренувалась для вирішення задачі апроксимації границі текучості як функції двох, трьох чи всіх чотирьох вимірюваних параметрів. Шляхом порівняння тестових виходів натренованих нейронних мереж мож-



на визначити оптимальну комбінацію вимірюваних параметрів. Критеріями відбору служать: мінімальна кількість вхідних параметрів, найкращий результат визначення границі текучості та мінімальна середня похибка. Кількість вхідних параметрів вказує на кількість різних технічних засобів, якими необхідно проводити вимірювання. Кращий результат дозволяє оцінювати здатність мережі максимально точно вирішувати задачу апроксимації функції границі текучості. Оціночна середня похибка розраховується як середнє значення абсолютної похибки визначення границі текучості по всім дев'ятьом мережам для конкретної комбінації параметрів. Вона вказує на характер загальної тенденції мереж до сходження при тренуванні для конкретної комбінації вхідних параметрів — чим менша така похибка, тим краще сходиться алгоритм тренування, а отже і взаємозв'язки між вхідними та вихідним параметрами більш стійкі.

Із чотирьох вимірюваних параметрів (HB , H_c , S , M) було сформовано набори по два, три та чотири параметри — загалом 11 можливих комбінацій.

Набір із 13 зразків труб був розділений на дві групи: *тренувальну* — результати вимірювань по 11 зразкам використовували для тренування нейронних мереж; *тестову* — результати вимірювань двох зразків пп. 1 та 4 з табл. 1, які не використовувались для тренування нейронних мереж і служили для тестування натренованих мереж.

Для кожної комбінації вхідних параметрів було здійснено тренування дев'яти нейронних мереж трьох різних архітектур (по три мережі з однаковою будовою):

Кількість вхідних параметрів	Архітектура		
2	10×1	12×1	16×1
3	12×3×1	21×6×1	24×12×1
4	20×4×1	24×8×1	24×125×4×1

Примітка. Архітектура 20×4×1 означає, що в першому прихованому шарі міститься 20 нейронів, в другому — 4, у вихідному — 1.

Підготовку даних (як вхідних, так і вихідних) проводили за стандартною процедурою нормування для отримання значень параметрів в межах [0 1].

Як тренувальний алгоритм, у всіх мережах брали алгоритм Левенберга–Марквардта [9], який використовується зазвичай для тренування невеликих мереж і характеризується швидким сходженням.

Необхідно відмітити, що вибір архітектури нейронних мереж, підготовки даних, вибору тестових наборів та тренувальних алгоритмів здійснюється на базі досвіду дослідника [9] і залежить від природи та складності поставленої задачі, а також об'єму наявних статистичних даних.

Після проведення тестувань натренованих нейронних мереж для кожної комбінації вхідних параметрів було отримано результати, які було оформлено в табл. 3 для аналізу згідно встановлених критеріїв. В таблиці виділені найбільш оптимальні

Таблиця 3. Порівняльна таблиця для вибору оптимальної комбінації параметрів

Номер	Кількість вхідних параметрів	Вхідні параметри	Кращий результат, МПа	Оціночна середня похибка, МПа
1	2	HB, H_c	31,1	67
2		HB, S	10,2	38,7
3		HB, M	11,6	30,7
4		H_c, S	45,3	66,4
5		H_c, M	24,5	45,5
6		S, M	9,9	40,5
7	3	HB, H_c, S	25,8	49,1
8		HB, H_c, M	24,9	69,6
9		HB, S, M	2,6	24,4
10		H_c, S, M	12,5	52,4
11	4	HB, H_c, S, M	7,6	41,8

Примітка. Кращий результат — мінімальне середнє значення абсолютної похибки визначення границі текучості для вказаної комбінації вхідних параметрів (вибирається одна мережа із 9). Оціночна середня похибка — середнє значення абсолютної похибки визначення границі текучості по всім мережам для вказаної комбінації вхідних параметрів. Результати визначення границі текучості усіма мережами були отримані при їх тестуванні.

комбінації для різних кількостей вхідних параметрів за вибраними критеріями. Після застосування першого критерію оптимальності (мінімальна кількість вхідних параметрів) та згідно критерію кращого результату оптимальними можуть вважатись комбінації (HB, S), (HB, M), (S, M). При цьому відмінності між кращими результатами для цих трьох комбінацій не є суттєвими. Якщо ж застосувати критерій мінімальної середньої похибки, то найбільш оптимальним вибором буде комбінація (HB, M) — твердість та теплопровідна характеристика.

Таким чином, в натренованій нейронній мережі в неявному виді міститься залежність границі текучості від твердості та теплопровідної характеристики. Записати цю залежність аналітично можливо, але вона матиме громіздкий запис, що зробить її аналіз практично неможливим. Тому авторами був розроблений спосіб графічного представлення так званої «поверхні рішення», яка була згенерована мережею в ході її тренування. На рис. 2 представлена така поверхня для нейронної мережі, яка дала найкращий результат для вибраної оптимальної комбінації параметрів.

Аналізуючи результати, представлені в табл. 3, можемо сказати, що включення коерцитивної сили до комплексу вхідних параметрів погіршує результати тестування, що може бути пов'язане із сильною анізотропією даної характеристики та можливим впливом факторів, які не були враховані в ході проведення досліджень; збільшення кількості вхідних параметрів не завжди сприяє більш точному визначенню вихідного параметра: при збільшенні кількості параметрів від двох (пп. 2 та 3 табл. 3) до трьох (п. 9 табл. 3) результати покращились, а при збільшенні до чотирьох параметрів (п.11 табл. 3) — погіршилися. Хоча при порівнянні пп. 2, 3 із п.11 покращення

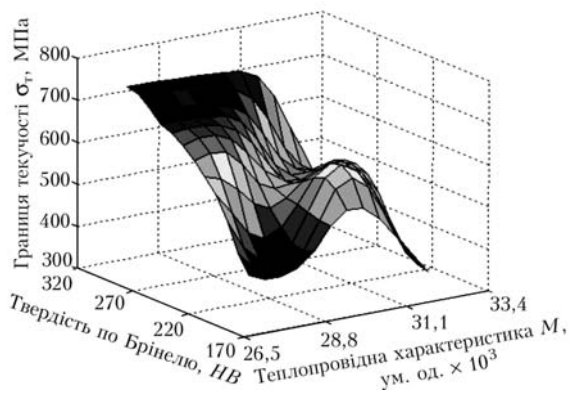


Рис. 2. Поверхня рішення, згенерована нейронною мережею

результатів очевидне і пояснюється збільшенням інформації про даний матеріал, що дає змогу із більшою достовірністю оцінювати його механічні характеристики.

Якщо відкинути перший критерій оптимальності (мінімальна кількість вхідних параметрів), то з табл.3 видно, що найкращою комбінацією вхідних параметрів для визначення границі текучості є комплекс даних — твердість, теплопровідна характеристика та покази приладу СІГМА-Т10.1. Основною проблемою в даному випадку постає налаштування приладу СІГМА-Т10.1, оскільки для цього необхідно мати велику кількість зразків.

На рис. 2 представлена так звана «поверхня рішення», згенерована мережею. З рисунка видно, що границя твердості прямо пропорційно залежить від твердості і обернено пропорційно від теплопровідної характеристики, що підтверджується знаками перед коефіцієнтами кореляції в табл. 2. Складний характер отриманої поверхні рішення свідчить про нелінійність взаємозв'язків між границею текучості та вхідними параметрами — таке заключення підтверджується тим, що коефіцієнти кореляції в табл. 2 не приймали значення дуже близькі до одиниці, адже стандартний алгоритм розрахунку коефіцієнтів кореляції передбачає наявність лінійної залежності між досліджуваними параметрами. Також необхідно відмітити, що складність отриманої поверхні рішення підтверджує доцільність застосування нейронних мереж для вирішення задачі нелінійної багатопараметрової апроксимації.

Висновки

Метод сумісного врахування кількох параметрів (твердості та теплопровідної характеристики) може бути використаний для визначення границі текучості матеріалу насосно-компресорних труб із достатньою точністю (похибка 2,6 %).

Взаємозв'язки комплексу вибраних параметрів та границі текучості мають складний нелінійний характер і можуть бути апроксимовані так званою «поверхнею рішення», згенерованою відповідною нейронною мережею.

Застосовані в роботі підходи до вибору параметрів та встановлення характеру взаємозв'язків між цими параметрами та механічними характеристиками є універсальними і можуть бути застосовані в інших галузях НК.

Рассмотрены вопросы применения метода совместного измерения нескольких параметров (теплопроводной характеристики и твердости) для определения физико-механических свойств материала металлоконструкций. Приведены результаты сравнительных исследований по установлению характера зависимости различных параметров неразрушающего контроля (включая теплопроводную характеристику и твердость) от предела текучести материала насосно-компрессорных труб.

Целью данной работы являются сравнительные исследования известных методов определения физико-механических свойств металлоконструкций и предлагаемого, а также установление наличия и характера зависимости предела текучести от информативных параметров контроля на примере насосно-компрессорных труб. Предложена и использована методика определения оптимальной комбинации параметров контроля, которая позволяла бы с наибольшей точностью получить предел текучести. Для решения этой задачи использованы алгоритмы нейронных сетей. Руководствуясь критерием минимального количества входных параметров контроля и минимальной ошибки определения предела текучести, удалось выбрать комплекс параметров — твердость и информативный параметр, характеризующий теплопроводность.

1. *Неруйнівний контроль труб нафтового сортаменту: Навч. підручник / О. Карпаш, П. Криничний, Є. Крижанівський, І. Мигаль, І. Рибич, Я. Зінчак. — Івано-Франківськ: Факел, 2001. — 380 с.*
2. *Криничний П. Я., Молодецький І. А. Прилад для контролю фізико-механічних характеристик труб нафтового сортаменту СІГМА-5Т // Методи та прилади контролю якості. — 1998. — № 2. — С. 9–10.*
3. *Трубы нефтяного сортамента: Справ. / 3-е изд., перераб. и доп. / Под общ. ред. А. Е. Сарояна. — М: Машиностроение, 1987. — 420 с.*
4. *Карпаш О. М., Молодецький І. А., Карпаш М. О. Общій обзор методов оценки физико-механических характеристик металлов // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2004. — № 2. — С. 18–22.*
5. *Карпаш М. О. Обґрунтування комплексного підходу до визначення фізико-механічних характеристик матеріалу металоконструкцій // Методи та прилади контролю якості. — 2004. — № 12. — С. 30–33.*
6. *Карпаш О., Карпаш М., Кісіль І. Прилад для контролю фізико-механічних характеристик металоконструкцій на базі вимірювання кількох параметрів // Тез. 3-й Науч.-практ. конф. «Организация неразрушающего контроля качества продукции в промышленности», 30 апреля–7 мая 2005 г., г. Аланья, Турция. — С. 3–14.*
7. <http://www.InfraredHeaters.com>
8. *Новий підхід до визначення фізико-механічних характеристик сталей неруйнівними методами / О. М. Карпаш, І. А. Молодецький, І. С. Кісіль, М. О. Карпаш // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів: 36. наук. праць. — 2004. — Вып. 9. — С. 80–85.*
9. *Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / Пер. с польск. И. Д. Рудинского. — М.: Финансы и статистика, 2004. — 344 с.*



ПРИМЕНЕНИЕ АРД-ДИАГРАММ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ КОНТРОЛЕ В РАДИАЛЬНОМ НАПРАВЛЕНИИ КАТАНЫХ КОЛЕСНЫХ ЦЕНТРОВ ЛОКОМОТИВОВ

Г. Г. БАСОВ, В. Л. МАРКОВ, А. Н. КИРЕЕВ

Представлены расчетные зависимости между относительным и абсолютным коэффициентом ослабления ультразвуковой волны при контроле катаных колесных центров в радиальном направлении, на основе которых получены расчетные АРД-диаграммы, позволяющие получить оценку допустимости несплошностей.

In the article are presented, got a computation way, dependences between the relative and absolute coefficient of weakening of ultrasonic wave at the ultrasonic control of the roller wheeled centers of locomotives in radial direction, which computation ADD-diagrams allowing to produce estimation of admission of defects are got on the basis of. Application of ADD-diagrams allows to promote authenticity of ultrasonic control of the roller wheeled centers of locomotives for providing of safety of motion on the ferrous road.

Внедрение новейших научных достижений на железнодорожном транспорте привело к стремительному развитию локомотивного хозяйства, в котором сосредоточена почти восьмая часть общей стоимости основных фондов железных дорог [1]. Тенденция повышения скоростей движения на железных дорогах привела к необходимости выпуска более мощных локомотивов с повышенными требованиями к качеству.

Одними из наиболее ответственных элементов ходовой экипажной части локомотивов, от исправной работы которых зависит безопасность движения на железных дорогах, являются колесные пары. В локомотивостроении наибольшее применение получили составные колеса — из бандажа и колесного центра. В последнее время при изготовлении составных колес ходовой экипажной части скоростных локомотивов все больше применяются катаные колесные центры, так как они имеют ряд преимуществ перед литыми: меньшую

неподрессоренную массу, лучшие показатели механических свойств.

Для обеспечения качества и безотказной работы катаные колесные центры в процессе производства подвергали ультразвуковому (УЗ) контролю на отсутствие внутренних недопустимых несплошностей металла в соответствии с ГОСТ 11018–2000 [2]. Ультразвуковому контролю подвергали в осевом направлении: обод и ступицу; в радиальном направлении: обод и зону перехода от обода к диску. В ранее существующих методиках УЗ контроля катаных колесных центров настройка чувствительности УЗ дефектоскопа и оценка допустимости несплошностей проводилась по стандартным образцам предприятия (СОП) с выполненными в них глухими сверлениями с плоским дном на разной глубине в контролируемой зоне. Оценка допустимости несплошностей по эталонным отражателям в стандартных образцах предприятия может быть выполнена только со значительной погрешностью [3]. Основную погрешность вносит разность затухания в изделии и СО.

Для уменьшения погрешности требуется переход к методике оценки допустимости несплошностей без применения СОП. Одним из таких способов методики оценки допустимости несплошностей является работа с АРД-диаграммами (амплитуда–расстояние–диаметр). Особенности работы с АРД-диаграммами в осевом направлении при УЗ кон-

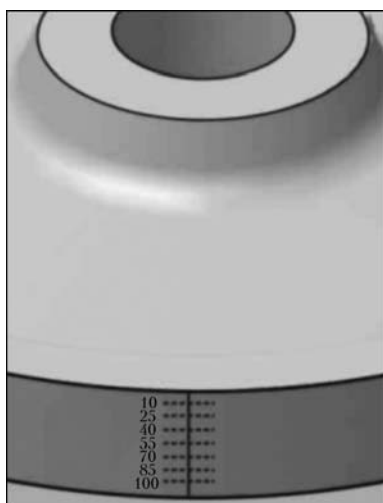


Рис. 1. Координаты преобразователя на ободу катаного колесного центра

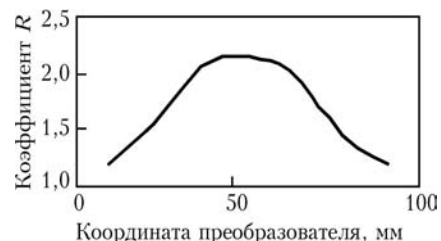


Рис. 2. Зависимость коэффициента R от координаты преобразователя

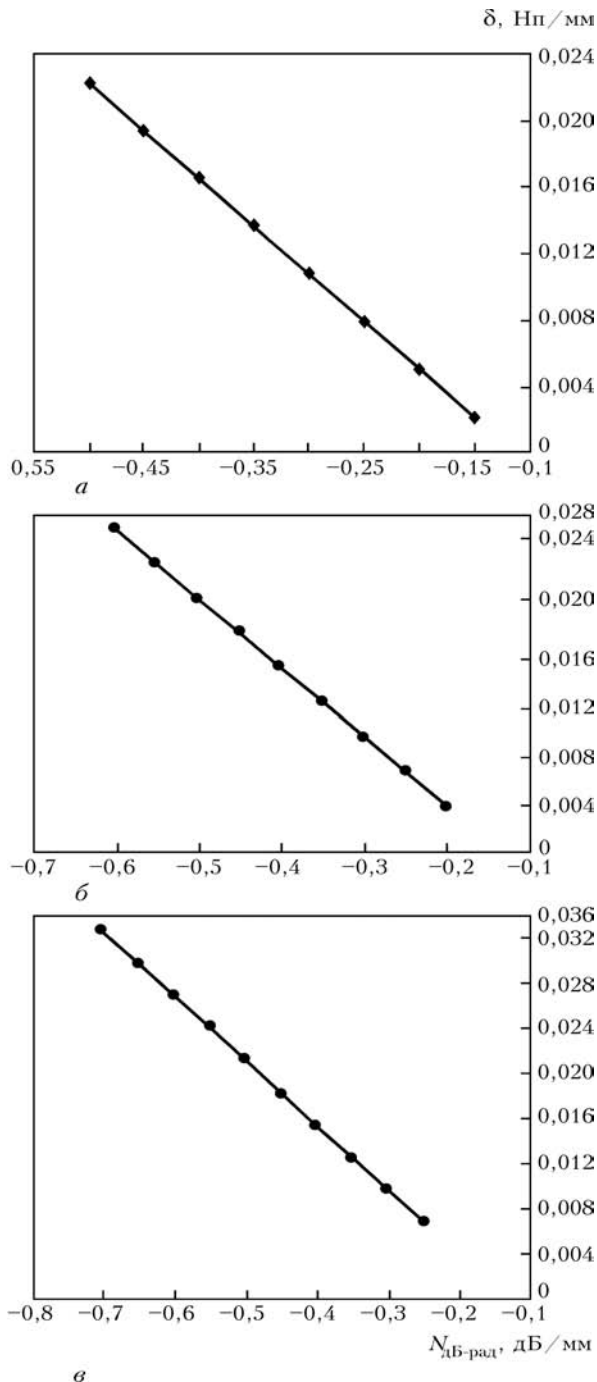


Рис. 3. Зависимость абсолютного коэффициента УЗ волны δ от относительного коэффициента ослабления $N_{\text{дБ-рад}}$ в радиальном направлении по координатам, мм: а – 10, 25, 85, 100; б – 40, 60; в – 55

троле катаных колесных центров на отсутствие внутренних недопустимых несплошностей рассмотрены в работе [4]. В радиальном направлении, в отличие от осевого, отсутствуют донная поверхность, эхо-сигнал от которой можно использовать для учета затухания УЗ волны в изделии. Помимо ослабления эхо-сигнала от несплошности в радиальном направлении вследствие затухания происходит ослабление за счет ввода УЗ волны через выпуклую цилиндрическую поверхность. Толщина контактного слоя между УЗ преобразователем и криволинейной поверхностью будет меньше для центральной и больше для краевых точек преоб-

разователя, и, кроме того, выпуклая цилиндрическая поверхность будет играть роль расфокусирующей линзы для УЗ волны. Влияние кривизны поверхности ввода УЗ волны на амплитуду эхо-сигнала от отражателей было исследовано в работах [5–7]. Радиус катаных колесных центров после предварительной механической обработки составляет 455 мм. Как следует из работы [7], пренебрегать кривизной поверхности ввода УЗ волны и пользоваться формулами акустического тракта для плоской поверхности ввода можно при радиусах кривизны, больших 500 мм.

Ранее Киреевым А. Н. была получена экспериментальная зависимость между относительным коэффициентом ослабления продольной УЗ волны $N_{\text{дБ-ос}}$ ($N_{\text{дБ-ос}} = A_{\text{дБ-дон}}/x$, где $A_{\text{дБ-дон}}$ – донный эхо-сигнал; x – расстояние до отражающей поверхности) в осевом направлении в ободу катаного колесного центра и относительным коэффициентом ослабления продольной УЗ волны $N_{\text{дБ-рад}}$ в радиальном направлении при различных координатах преобразователя (рис. 1). По результатам исследований получена зависимость коэффициента R , характеризующего связь между $N_{\text{дБ-рад}}$ и $N_{\text{дБ-ос}}$ ($N_{\text{дБ-рад}} = R \cdot N_{\text{дБ-ос}}$), от различных координат преобразователя (рис. 2).

Цель данной работы – получение расчетных зависимостей между относительным коэффициентом ослабления УЗ волны в радиальном направлении $N_{\text{дБ-рад}}$ и абсолютным коэффициентом ослабления в радиальном направлении δ для различных координат УЗ преобразователя, а также построение размерных АРД-диаграмм для оценки сплошности несплошностей.

Получена формула, отображающая зависимость между относительным и абсолютным коэффициентами ослабления УЗ волны:

$$\delta = - \frac{\ln\left(\frac{10^{N_{\text{дБ-рад}}} \cdot x \cdot 2\lambda x}{S_a}\right)}{2x},$$

где λ – длина УЗ волны; S_a – площадь излучателя преобразователя.

По этой формуле проведен расчет и получена зависимость между относительным коэффициентом ослабления УЗ волны в радиальном направлении $N_{\text{дБ-рад}}$ и абсолютным коэффициентом ослабления в радиальном направлении δ для различных координат расположения УЗ преобразователя (рис. 3).

Воспользовавшись приведенными ниже формулами [9] для расчета амплитуды эхо-сигнала от плоскодонных цилиндрических отражателей:

$$\left|\frac{A}{A_0}\right| = \frac{S_a S_b}{\lambda^2 x^2} e^{-2\delta x}$$

(A – амплитуда принятого сигнала; A_0 – амплитуда опорного сигнала, в качестве которого принимается эхо-сигнал от донной поверхности (59 мм) в стандартном образце СО₂ [8]; S_b – площадь отражателя; x – расстояние до отра-

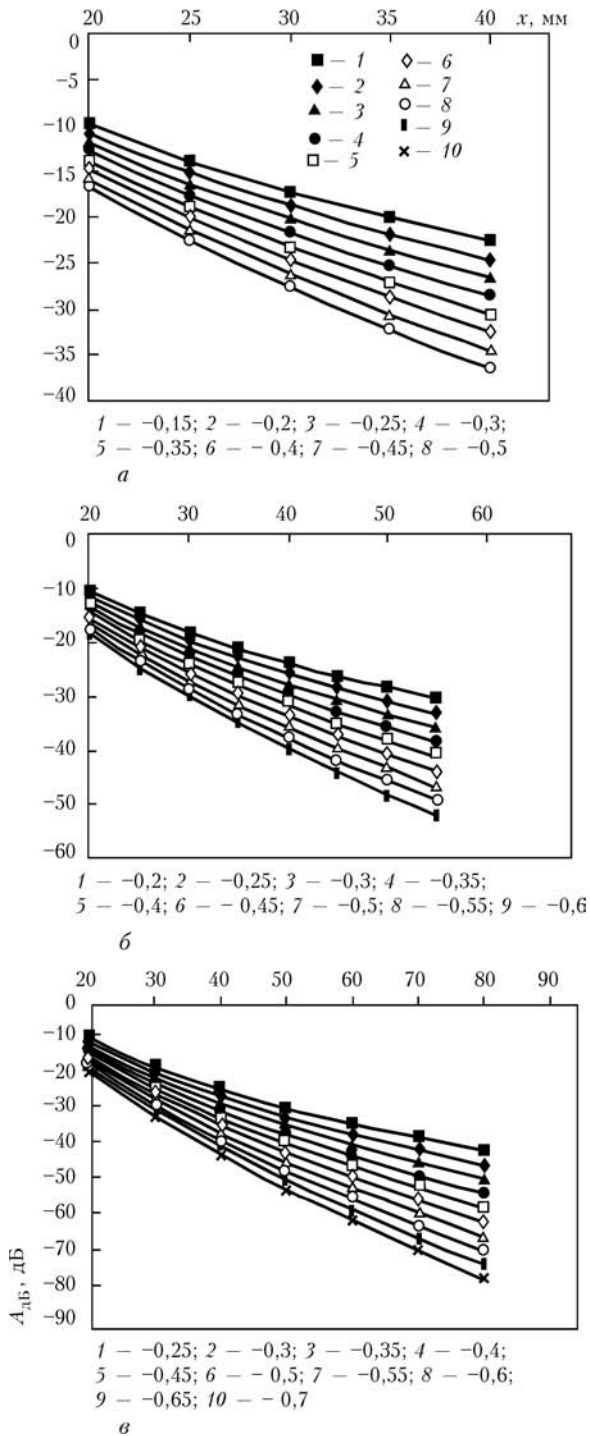


Рис. 4. Расчетные АРД-диаграммы для оценки допустимости несплошностей для различного затухания УЗ волны $N_{дБ-рад}$ и различных координат преобразователя, мм: а — координаты 10, 25, 85, 100; б — координаты 40, 60; в — координата 55 ($A_{дБ}$ — амплитуда эхо-сигнала от отражателя)

жателя; $A_{дБ} = 20 \ln|A/A_0|$) были построены расчетные АРД-диаграммы для оценки допустимости несплошностей при УЗ контроле в радиальном направлении катаных колесных центров (рис. 4).

Диаметр отражателя приняли равным 3 мм, что соответствует предельной чувствительности при УЗ контроле катаных колесных центров. Кривые были построены для различных коэффициентов ослабления УЗ волны и для различных координат расположения УЗ преобразователя.

Выводы

Получены зависимости между относительным коэффициентом ослабления УЗ волны в радиальном направлении $N_{дБ-рад}$ и абсолютным коэффициентом ослабления в радиальном направлении σ для различных координат расположения УЗ преобразователя, а также построены размерные АРД-диаграммы для оценки допустимости несплошностей при УЗ контроле в радиальном направлении катаных колесных центров. АРД-диаграммы построены для различного коэффициента ослабления УЗ волны в изделии и для различных координат преобразователя на поверхности ввода УЗ волны.

1. *Локомотивное хозяйство* / С. Я. Айзинбуд, В. А. Гутковский, П. И. Кельперис и др. — М.: Транспорт, 1986. — 263 с.
2. *ГОСТ 11018-2000*. Тяговый подвижной состав железных дорог колеи 1520 мм. Колесные пары. Общие технические условия.
3. *Ермолов И. Н., Алешин Н. П., Потапов А. И.* Неразрушающий контроль. — Кн. 2. Акустические методы контроля. — М.: Высш. шк., 1991. — 283 с.
4. *Киреев А. Н.* Улучшение показателей качества и надежности катаных колесных центров тепловозов путем повышения достоверности УЗ контроля // Рухомий склад та спеціальна техніка залізничного транспорту / 36. наук. праць УКРДАЗТ. — 2004. — № 64. — С. 110-117.
5. *Особенности УЗ контроля в радиальном направлении осей колесных пар подвижного состава железных дорог* / Г. Г. Басов, В. Л. Марков, А. Н. Киреев, С. А. Волкова // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2004. — № 3. — С. 49-50.
6. *Голубев А. С., Паврос С. К.* Расчет акустического тракта эходефектоскопа при контроле изделий с криволинейной поверхностью контактным способом // Изв. Ленинград. электротехнич. ин-та. — 1970. — № 89. — С. 122-124.
7. *Розина М. В.* Некоторые особенности УЗ контроля тел вращения // Дефектоскопия. — 1966. — № 4. — С. 16-21.
8. *ГОСТ 14782*. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые.
9. *Ермолов И. Н.* Теория и практика УЗ контроля. — М.: Машиностроение, 1981. — 240 с.



ТЕРМОГРАФИЧЕСКОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ДНЕПРОВСКОЙ ГЭС

С. Н. МЕШКОВ, Р. П. ОРЕЛ, В. А. МАСЛОВА

Приведены методики и результаты наружного и внутреннего термографирования гидротехнических сооружений Днепровской ГЭС. Показано, что исследованные тепловые поля объектов существенно неоднородны. При обследовании верхней потерны обнаружены участки с повышенной температурой, что свидетельствует о наличии фильтрации воды. Подтверждено, что температурное поле может служить диагностическим признаком оценки состояния гидросооружений. Показана высокая эффективность применения термографии и намечены пути развития температурного мониторинга гидросооружений.

The paper presents the procedures and results of outer and inner thermography of hydraulic engineering facilities of Dneprovsky HPS. It is proved that the studied thermal fields of the objects are significantly non-uniform. Regions of increased temperature are found at examination of the upper gallery, which is indicative of water filtration. It is confirmed that the temperature field may be a diagnostic indication for evaluation of the condition of hydraulic facilities. A high effectiveness of thermography application is shown and directions of development of temperature monitoring of hydraulic facilities are outlined.

Большая часть гидротехнических сооружений (плотин) в Украине эксплуатируется уже много десятилетий и нуждается в тщательном контроле технического состояния. Для проведения такого контроля наряду с традиционными (регламентированными) средствами и методами целесообразно рассмотреть возможность применения современных средств и методов, к числу которых относится термография. Термография в настоящее время является наиболее перспективным и динамически развивающимся направлением неразрушающего контроля (НК) и технической диагностики (ТД) [1].

При возведении гравитационных плотин экзотермия, а также колебания температуры наружного воздуха вызывают в бетонном массиве значительные температурные напряжения, в результате чего возникают трещины, которые могут значительно изменить схему статической работы сооружения и понизить его несущую способность [2]. Поэтому неравновесное температурное поле тела плотины является одним из информативных признаков, используемых для оценки прочностных свойств гидротехнических сооружений.

Информация о температуре в различных точках тела плотины позволяет проводить теплофизическое моделирование, которое широко используется в мировой практике как при проектировании различных плотин, так и при их эксплуатации. При этом оказывается возможным прогнозировать как динамику развития температурного поля в теле плотины, так и рассчитывать карту напряжений, вызванных температурными перепадами [3]. Если реальные значения температуры, полученные от термопар, значительно отличаются от расчетных, то это позволяет сделать вывод о том, что в структуре тела плотины произошли изменения, вызванные либо распределенными дефектами типа выщелачивания бетона либо локальными неоднородностями типа трещин.

Измерение теплового поля до настоящего времени осуществляется контактным методом с помощью датчиков, размещенных в теле плотины [3]. Реализация контактного метода требует значительных материальных затрат и времени. Термографический метод позволяет регистрировать температурное поле гидротехнических объектов бесконтактным путем, что делает контроль оперативным, информативным и экономичным [4].

Объекты термографирования. Специалистами НТЦ «Термоконтроль» было проведено термографическое обследование комплекса гидросооружений Днепровской ГЭС. Обследования состояли в проведении наружного и внутреннего термографирования. Такое разделение связано с отличиями термографических ситуаций, которые возникают при обследовании объектов снаружи и внутри. Все работы были выполнены за три дня.

Объектами внутреннего термографирования являлись: верхняя потерна водосливной плотины; галерея щитовой стенки ГЭС-1; галерея машинного зала ГЭС-2.

Особенностями термографической ситуации на указанных объектах являлись: существенное отличие средней температуры объекта от температуры окружающей среды; повышенная влажность (на некоторых участках до 100 %); наличие на обследованных поверхностях стен кабелей, измерительных приборов, распределительных щитов, осветительной техники; наличие на стенах белых выделений (продукты разложения бетона), которые наблюдались визуально.

Анализ термограмм и соответствующих им видимых изображений показал, что в целом уровень освещенности существенно не влиял на результаты термографирования. При относительно малых расстояниях до обследуемых объектов повышенную влажность также не следует считать влияющим фактором. Белые выделения на стенах не давали

заметного отличия от сухих или влажных участков бетона с той же температурой.

Объектами наружного термографирования являлись: щитовая стенка ГЭС-1; водосливная плотина; водоводы ГЭС-2.

Методика термографирования. Основой методики являлся ГОСТ 26629–85 «Здания и сооружения. Метод тепловизионного контроля теплоизоляции ограждающих конструкций» и накопленный авторами опыт термографического обследования крупногабаритных объектов энергетики и строительства.

Выбор точек съемки определялся на основании предварительного осмотра объектов и технической документации.

При обследовании потерн и галерей гидросооружений затруднено применение метода «одного репера» [4], где в качестве реперной температуры выбиралась наименьшая средняя температура фрагмента обследуемого объекта. При обследовании этих объектов в качестве реперной температуры была условно выбрана точка, соответствующая середине выбранного температурного диапазона работы тепловизора.

Для получения видимых изображений исследуемых объектов совместно с тепловизором применялась цифровая камера. При анализе полученных термограмм использовалось стандартное программное обеспечение V.01-07-02 тепловизора IRTIS-200. По термограмме определялось значение средней температуры в кадре (T_{cp}). Средняя температура определялась по выбранной площадке, в области кадра, свободной от посторонних предметов (осветителей, приборов и другого оборудования). Расположенные на мультискринах в порядке возрастания номеров контрольных точек (меток) термограммы давали полную картину о тепловом режиме всего объекта обследования. В итоге строилось распределение средней температуры T_{cp} вдоль потерны.

Внутреннее термографирование. Обследования показали, что температурное поле в верхней потерне и галереях гидротехнических сооружений Днепровской ГЭС неоднородное. Все участки потерн и галерей имеют свои отличные тепловые картины, которые могут служить их характеристикой или своеобразным паспортом.

Верхняя потерна представляла собой коридор длиной 611 м и размерами 3,5×3,5 м. Полная площадь поверхности оценена в $S = 8600 \text{ м}^2$. По длине потерны на табличках были расположены 47 указателей, соответствующих водосливным пролетам плотины. При термографировании место установки тепловизора привязывалось к положению указателей.

В верхней потерне выделено несколько участков с аномальной температурой. Причиной повышенной температуры на этих участках является более высокая температура фильтрующейся воды. На рис. 1 показано распределение температуры по длине верхней потерны.

В процессе термографирования были более детально исследованы несколько участков потерны. Были измерены температуры водонапорной стенки

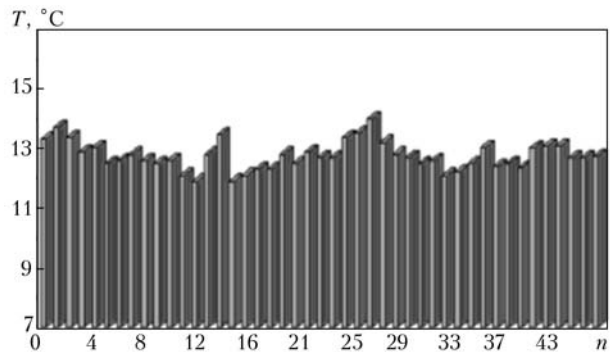


Рис. 1. Распределение температуры по длине верхней потерны (n — номер водосливного пролета)

Температура фильтрующейся воды на различных участках верхней потерны

Объект	$T_{ст}, °C$	$T_{в}, °C$
Водонапорная стенка у метки 1	13,2	14,9
Водонапорная стенка у метки 27	14,2	18,9
	13,6	16,4
Шов на водонапорной стенке у метки 44	13,7	16,5

и фильтрующейся воды на участках: 1, 27, 44 водосливных пролетов. Результаты проведенных измерений приведены в таблице.

Выяснилось, что фильтрующаяся вода имеет разную температуру на разных участках. Может возникать ситуация, когда на одном и том же участке из разных швов и трещин выходит вода разной температуры (пролет 27). На всех участках с повышенной средней температурой обнаружена фильтрация «горячей» воды. Температура такой воды на 1...4 °C отличается от «холодной» воды, которая постоянно фильтруется по всей длине потерны. Отличия температур воды на разных участках можно объяснить различной скоростью ее фильтрации. Следовательно, обнаруженные тепловые аномалии указывают на некоторый уровень нарушения целостности тела плотины в указанных местах. На рис. 2 показана термограмма с фильтрацией «горячей» воды.

Галерея щитовой стенки ГЭС-1 представляла коридор длиной 250 м и размерами 2,5×2,5 м. Полная площадь поверхности оценена в $S = 250 \text{ м}^2$. Ори-

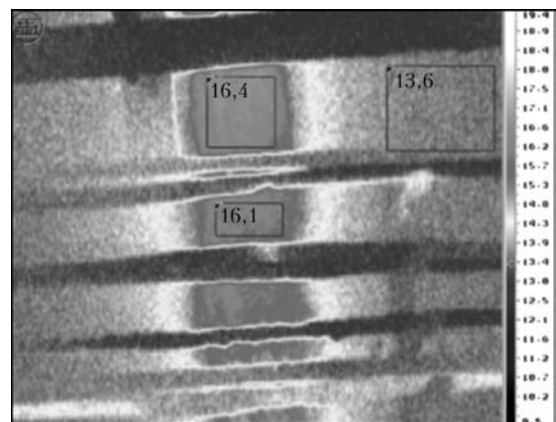


Рис. 2. Термограмма фрагмента водонапорной стенки у пролета 27 с фильтрацией «горячей» воды — разность между температурой воды и стенки составляет 2,8 °C



ентирами при проведении съемки являлись вертикальные технологические швы. По длине галереи было 20 швов.

Распределение температуры по длине галереи щитовой стенки ГЭС-1 от глухой щитовой стенки до сопряжения с водосливной плотиной имеет тенденцию к повышению и показано на рис. 3. На конечном участке (сопряжения с плотиной) влажность достигала 100 % и затрудняла проведение термографирования.

Отличие между температурой на начальном и конечном участках составляет порядка 3 °С.

Галерея машинного зала ГЭС-2 имела длину 200 м, размеры составляли 2,5×2,5 м, полная площадь поверхности $S = 2000 \text{ м}^2$. Ориентирами при проведении съемки являлись секции, соответствовавшие агрегатам ГЭС-2. По длине галереи было 8 секций.

В галерее машинного зала ГЭС-2 температурное поле равномерное. Средняя температура составляет примерно 21 °С. Измерения температуры фильтрующей воды на участке 5 секции показали, что температура воды практически не отличается от температуры стенок галереи. На рис. 4 показано полученное распределение температуры.

Полученные результаты позволяют рассматривать термографический метод как эффективное средство для фильтрационных исследований гидросооружений.

Наружное термографирование. Особенности наружного термографирования являлись влиянием окружающей среды и неоднородностей на поверхности объектов (наличие растительности, отслоений покрытия и т. д.).

Щитовая стенка ГЭС-1 — бетонное, частично железобетонное сооружение с девятью напорными трубопроводами. Размеры объекта составляли: длина 216 м, высота 38 м. Полная площадь была оценена в 8200 м^2 . Тепловизионная съемка щитовой стенки ГЭС-1 проводилась согласно схеме, изображенной на рис. 5.

В ходе сплошного мониторинга с помощью тепловизора осмотрена вся поверхность щитовой стенки ГЭС-1 (вертикальная и наклонная) и получено 40 термограмм и такое же число видимых изображений

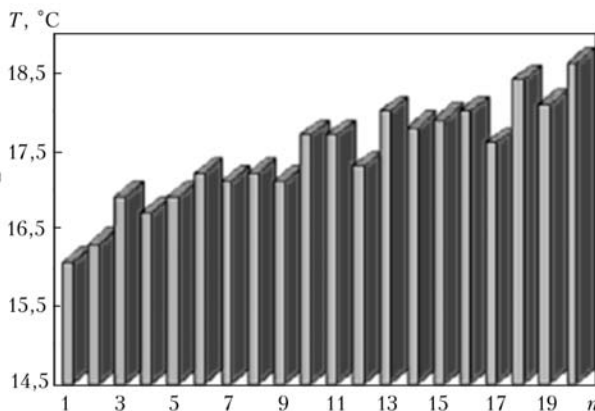


Рис. 3. Распределение температур по длине галереи щитовой стенки ГЭС-1 (n — номер шва)

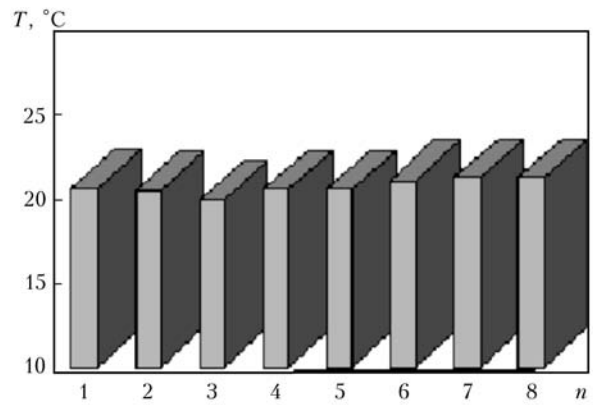


Рис. 4. Распределение температур по длине галереи машинного зала ГЭС-2 (n — номер секции)

ражений фрагментов щитовой стенки. Ориентирами при съемке служили мачты линии электропередач, установленные по всей длине стенки.

Согласно рекомендациям [4, 5], тепловизионная съемка проводилась в вечернее время после захода солнца. На крыше машинного зала ГЭС-1 были выбраны 10, точек из которых проводилась съемка (по четыре термограммы с каждой точки со взаимным перекрытием, которое составляло 25 %).

Состояние поверхности щитовой стенки ГЭС-1 (наличие мест без наружного покрытия, фильтрация) сильно искажает термограммы (рис. 6), однако границы фильтрации определяются достаточно четко. Увлажнения швов, незаметные на видимых изображениях, хорошо видны на термограммах, что позволяет использовать полученные сведения для разработки системы противофильтрационных мероприятий. Повторное термографирование после ремонта может оценить качество проведенных ремонтных работ.

Водосливная бетонная гравитационная плотина разрезного типа, расположенная по окружности радиусом 600 м, разбита на 47 водосливных пролетов, шириной до 13 м. Длина водосливного фронта 611 м, высота плотины 60 м. Полная площадь была оценена в 36700 м^2 . Тепловизионную съемку водосливной плотины проводилась согласно схеме, показанный на рис. 7. В ходе термографирования осмотрены шесть фрагментов плотины и помимо термограмм получены видимые изображения обследуемого объекта.

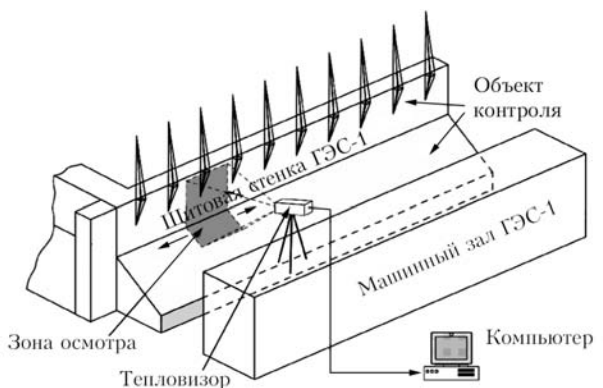


Рис. 5. Схема наружного термографирования щитовой стенки ГЭС-1

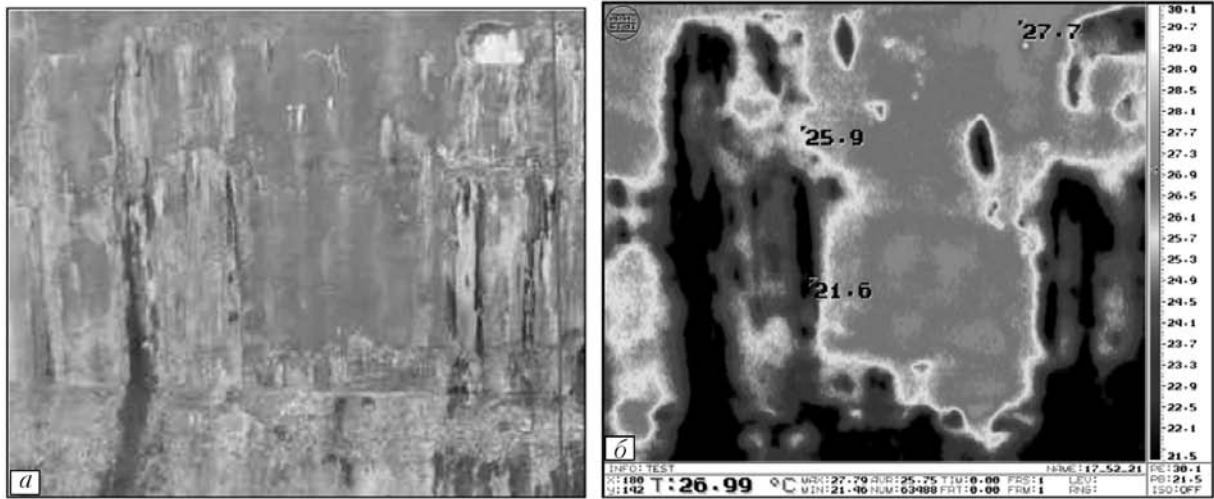


Рис. 6. Видимое изображение (а) и термограмма (б) части щитовой стенки ГЭС-1 (секция 1-го агрегата)

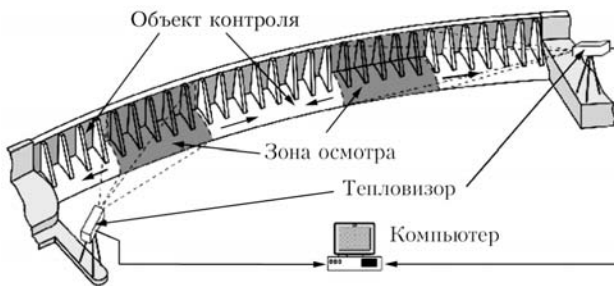


Рис. 7. Схема наружного термографирования водосливной плиты

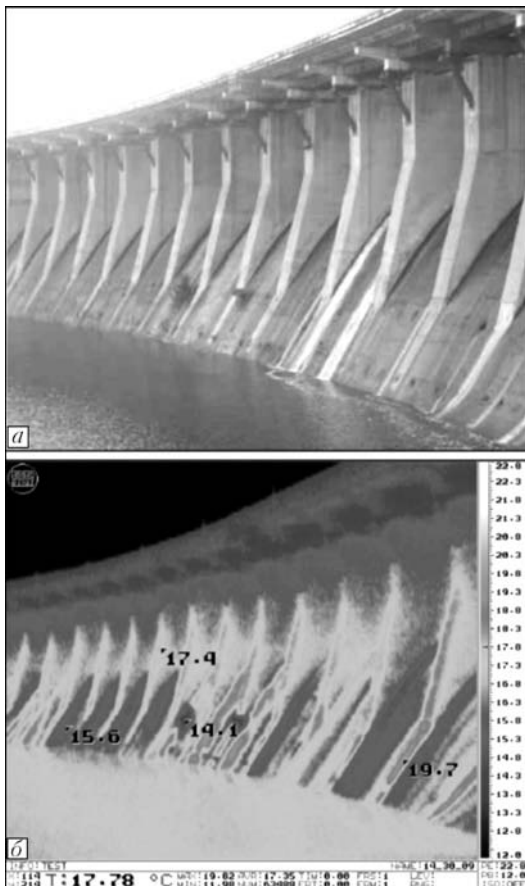


Рис. 8. Видимое изображения (а) и термограмма (б) водосливной плиты со стороны ГЭС-2 (12...24 пролеты)

Тепловизионная съемка проводилась с крайней точки пирса со стороны ГЭС-1 в вечернее время после захода солнца (четыре термограммы с взаимным перекрытием), а также со стороны ГЭС-2 в облачную погоду в дневное время (две термограммы с взаимным перекрытием). На рис. 8 показаны результаты термографирования.

Одноразовая съемка не позволяет определить наличие трещин в объекте. Для обнаружения трещин в зданиях и сооружениях термографическим методом необходимы многократные наблюдения в разное время суток [4, 5].

Тепловизионная съемка **водоводов ГЭС-2** проводилась согласно схеме, изображенной на рис. 9. В ходе мониторинга с помощью тепловизора осмотрена вся поверхность водоводов ГЭС-2, и записаны термограммы восьми фрагментов водоводов с соответствующими фотографиями видимых изображений фрагментов обследуемого объекта. Фрагменты выбирались, исходя из наличия температурных неоднородностей на поверхности обследуемого объекта.

Тепловизионная съемка проводилась с точек, находящихся непосредственно перед водоводами в дневное время в облачную погоду.

Полученные термограммы как и в случае с защитной стенкой ГЭС-1 дополняют визуальные наблюдения.

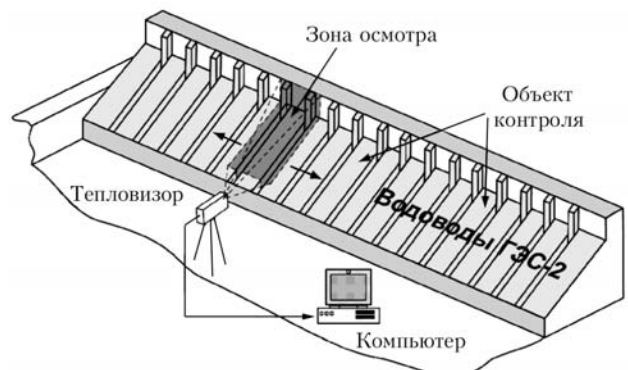


Рис. 9. Схема наружного термографирования водоводов ГЭС-2



Выводы

В результате проведенного термографического обследования получена новая важная информация о температурных режимах гидротехнических сооружений Днепровской ГЭС.

Температурное поле в верхней потерне и галереях гидротехнических сооружений Днепровской ГЭС неоднородное. Фильтрация через бетон и швы сооружений носит в разных местах различный характер и данные для одного участка неприменимы для другого.

В верхней потерне выделено пять участков с повышенной температурой: *1-й участок* — район 1 водосливного пролета; *2-й участок* — район 13-14 водосливных пролетов; *3-й участок* — район 25-28 водосливных пролетов; *4-й участок* — район 36 водосливного пролета; *5-й участок* — район 42-44 водосливных пролетов.

Причиной повышенной температуры на участках верхней потерны является более высокая температура фильтрующейся воды, что говорит о том, что на этих участках вода быстрее проникает сквозь тело плотины и не успевает охладиться до средней температуры потерны. Температура фильтрующейся воды может превышать температуру стенки на 3...4 °С.

Распределение температуры по длине галереи щитовой стенки ГЭС-1 от глухой щитовой стенки до сопряжения с водосливной плотиной имеет тенденцию к повышению. Отличие между температурой на начальном и конечном участках составляет порядка 3 °С.

В галерее машинного зала ГЭС-2 температурное поле равномерное. Средняя температура составляет примерно 21 °С. Температура фильтрующейся воды не отличается от температуры стенок галереи.

Состояние поверхности щитовой стенки ГЭС-1 (наличие мест без наружного покрытия, фильтрация) сильно искажает термограммы, однако гра-

ницы фильтрации определяются достаточно четко. Увлажнения швов, незаметные на видимых изображениях, хорошо видны на термограммах, что позволяет использовать полученные сведения для разработки системы противофильтрационных мероприятий. Повторное термографирование после ремонта может оценить качество проведенных ремонтных работ.

Термограммы водоводов ГЭС-2 дополняют визуальную информацию. Регулярный мониторинг позволил бы определять динамику развития дефектов швов и места проведения ремонтных работ.

Для выявления аномалий тепловой картины (и возможных нарушений) в гидротехнических сооружениях одной серии измерений недостаточно. Мировой опыт применения термографии в строительстве показывает, что для выявления скрытых дефектов необходимы регулярные наблюдения в различное время года и суток.

Производительность термографического метода и его информативность позволяет создать тепловые паспорта гидросооружений Украины и проводить их регулярный температурный мониторинг.

Дальнейшими направлениями исследований могут являться совершенствование аппарата обработки термограмм с целью повышения их информативности и создание базы данных по каждому из обследованных объектов.

1. *Маслова В. А., Стороженко В. А.* Термография в диагностике и неразрушающем контроле. — Харьков. — Компания СМИТ, 2004. — 160 с.
2. *Исследование сооружений и оборудования гидроэлектростанций // Сб. статей под ред. Ф. Ф. Губина.* — М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. — 119 с.
3. *Maisano P. A., Forbes B. A., Miskel O. A., Taylor M. J.* Cadiangullong RCC Dam: Monitored Performance Versus Design Expectations. — Abstracts of 4-th International Symposium on RCC Dam, 17-19 November 2003, Madrid.
4. *Дроздов В. А., Сухарев В. И.* Термография в строительстве. — М.: Стройиздат, 1987. — 238 с.
5. *Неразрушающий контроль / Справ. Под ред. В. В. Клюева.* — Т. 5: В 2 кн. Кн. 1: Тепловой контроль / В. П. Вавилов. — М.: Машиностроение, 2004. — 679 с.

Харьков. ун-т техн. электроники

Поступила в редакцию
17.02.2005



IX ЕВРОПЕЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ

25-29 сентября 2006

г. Берлин

Со всеми подробностями о конференции и выставке можно ознакомиться на сайте www.ronktd.ru/text/news/?id=47

Контактные лица:

По вопросам участия в конференции:
Steffi Schaeske
Тел.: +49 30 678 07 120
Факс: +49 30 678 07 129
E-mail: mail@ecndt2006.info

По вопросам участия в выставке:
Hannelore Wessel
Тел.: +49 30 678 07 106
Факс: +49 30 678 07 129
E-mail: exhibition@ecndt2006.info



О КОНТРОЛЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ НИЗКОЧАСТОТНЫМИ ВОЛНАМИ НОРМАЛЬНОГО ТИПА

А. А. СЕЛЬСКИЙ, В. И. ГОРДЕЛИЙ

Исследования в области применения низкочастотных волн для контроля железнодорожных рельсов в Советском Союзе начались еще в 1970-х годах [1–3], но позднее (начало 1990-х годов) были прерваны ввиду известных общих политико-экономических коллизий. В настоящее время этот вопрос вновь вызывает интерес, и некоторые научные и производственные организации (в том числе НПП «Вигор» в содружестве с красноярским холдингом «Регионтехсервис-НК») обратились к этой теме.

Известно, что наиболее устойчивая к ослаблению на акустическом тракте изгибная мода волн Лэмба a_0 чаще всего может быть получена вырождением рэлеевской волны, если толщина плоскопараллельного объекта существенно меньше длины волны.

Вместе с тем головка железнодорожного рельса имеет такие размеры сечения, при которых даже на очень низких частотах сложно говорить о вырождении волн Рэля в нулевую изгибную моду волн Лэмба. Но, тем не менее, неоднородная нормальная волна образуется и, как показывают эксперименты и практика [3, 4], ее фронт весьма надежно охватывает все сечение рельса.

На частоте 0,1 МГц при угле ввода больше второго критического в стальном объекте вырабатывается рэлеевская волна длиной 30 мм. Уже вблизи ПЭП эта волна в целом охватит приповерхностный слой металла, по толщине близкий к ее длине, но интенсивность колебаний в пределах этого слоя будет убывающей от поверхности по глубине. Приведем классические функции, связывающие амплитуды продольных и поперечных составляющих колебаний точек и глубину их расположения при прохождении волн Рэля:

$$\frac{u_l}{A} = e^{-y \sqrt{k_s^2 - k_l^2}}, \quad (1), \quad \frac{u_t}{B} = e^{-y \sqrt{k_s^2 - k_t^2}}, \quad (2),$$

где u_l, u_t — соответственно амплитуды продольной и поперечной составляющих на глубине y, A, B — то же, на поверхности; $k_s = 2\pi f / C_R$ — волновое число для волн Рэля; $k_l = 2\pi f / C_l, k_t = 2\pi f / C_t$ — волновые числа для продольных и поперечных волн Рэля соответственно.

Расчет по данным формулам показывает, что в пределах ослабления энергии по фронту до 6 дБ толщина такого слоя составит приблизительно 20 мм.

Но главный интерес представляет расхождение фронта волны в плоскости поверхности по мере ее движения от преобразователя. Вследствие низкой частоты расчетный угол раскрытия диаграммы направленности в плоскости поверхности объекта оказывается очень большим (рис. 1), т. е. фронт быстро увеличивается по ширине при малых амплитудных потерях от затухания. Поэтому если расположить источник на середине поверхности катания (рис. 2, а), то из-за широкого расхождения фронта по профилю поверхности рельса уже на весьма малом удалении от него получается захват площадью активного фронта большей части головки (рис. 2, б–г), а еще дальше — выход в шейку (рис. 2, д, е), затем — в подошву (рис. 2, ж, з). К моменту выхода в шейку сердцевина головки охвачена фронтом волны слабее приповерхностных слоев, поэтому выбранный предел допустимого ослабления (6 дБ) недостаточен, и это должно быть учтено некоторым повышением чувствительности поиска. А вот момент выхода фронта в шейку (рис. 2, г) весьма интересен.

Пока фронт волн занимал только головку, интерференция его фланговых частей, идущих по поверхности катания, боковым и подголовочным поверхностям, слабо способствовала «утилизации» волновой энергии. При этом волны, синхронно идущие по левой и правой боковым поверхностям, в сердцевине головки еще не налагались одна на другую (рис. 2, в), так как стандартная ширина головки железнодорожного рельса 76 мм значительно превышает удвоенную зону активного влияния рэлеевской волны по глубине.

Однако на входе флангов фронта волны в шейку (рис. 2, г) происходит их взаимное строго синфазное наложение, из-за чего в шейке возникает идеальная мода растяже-



Рис. 1. Диаграмма направленности излучения–приема рэлеевских волн в плоскости поверхности ввода (материал ОК — сталь, ширина источника 14 мм, частота 0,1 МГц)

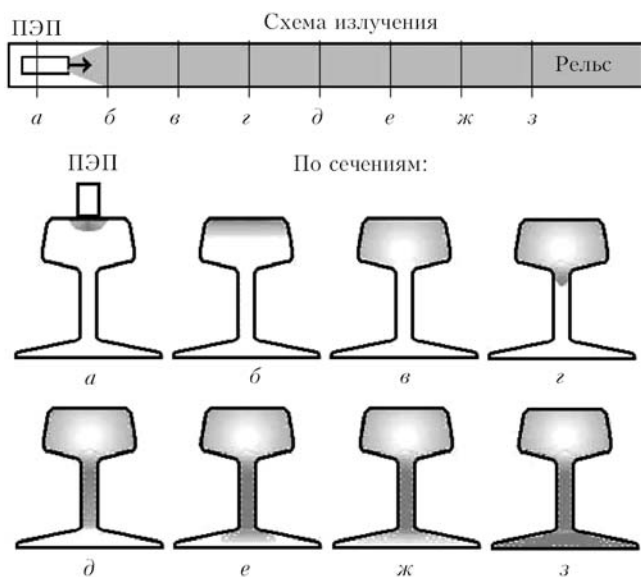


Рис. 2. Постепенное обтекание фронтом волн Рэлея профиля рельса

торый рубеж, за которым фактор потерь от расхождения фронта исключается полностью. То же самое относится и к отраженному от дефекта сигналу. Задавшись предельным уровнем ослабления по диаграмме направленности (т. е. углом отклонения краевого луча) и зная размеры профиля рельса, нетрудно рассчитать, на каком удалении фронт волны заполнит весь профиль (за исключением малой зоны в сердцевине головки). С учетом стандартных размеров профиля рельса для угла отклонения краевого луча 31° (на уровне ослабления излучаемого сигнала 3 дБ по рис. 1, т. е. 6 дБ для излучения-приема) такое удаление составит приблизительно 500 мм. Для прибора **УДС1-20**, на котором в 1980-х годах проводили первые исследования такого рода, полученный размер поглощается паспортной «ближней» зоной недостоверности (1 м), поэтому, пользуясь этим прибором или его аналогом, мы вправе говорить о том, что далее в рабочей зоне с одной установки преобразователя зондируем сразу весь профиль рельса.

Как видно из рис. 2, сердцевина головки в итоге остается слабо охваченной фронтом поверхностной волны Рэлея. По расчетам, проведенным по формулам (1), (2) с переводом итога в децибелы, ослабление амплитуды сигнала в центре головки (на глубине 20 мм) относительно поверхности составляет 14 дБ (т. е. в 5 раз). В свете того, что смоделировать исключительно внутренний дефект в сердцевине головки на удалении от торца рельса крайне трудно, и модели дефектов выполняются обычно с выходом на поверхность (засверловка, зарубка, надпил, фрезерование), это означает, что при контроле железнодорожных рельсов нормальными волнами на частоте 0,1 МГц шаг между браковочным уровнем чувствительности, устанавливаемым по отражению от модели предельно допустимого дефекта, и поисковым уровнем должен быть не менее 14 дБ.

Опыт эксплуатации установок входного контроля рельсов **УД-ЭМА-РСР** разработки **НПП «ВИГОР»** показал, что представленный здесь фактор «обтекания» фронтом поверхностной волны профиля железнодорожного рельса существует и способствует сохранению высокой чувствительности сигнала по отражению на весьма большом удалении от источника даже на частоте 0,5 МГц, т. е. в 5 раз выше той, на которой проводили первичные исследования.

1. Харитонов А. В. Развитие и проблемы теории нормальных волн в ультразвуковой дефектоскопии // Дефектоскопия. — 1979. — № 7. — С. 59–67.
2. Соседов В. Н., Пасси С. Х. Состояние и перспективы развития разработок средств ультразвукового неразрушающего контроля // Там же. — 1988. — № 8. — С. 3–9.
3. Дымкин Г. Я. Теоретические основы, методология и принципы построения аппаратуры низкочастотного ультразвукового контроля металлопродукции / Дис. на соискание уч. степени докт. техн. наук. — М: ЦНИИТМАШ, 1991.
4. Сельский А. А. Обзор неразрушающих методов контроля механического оборудования Красноярского наклонного рельсового судоподъемника // Информ.-техн. сб. «Водные пути и сооружения». — М: Мин. реч. флота РСФСР. — 1990. — С. 10–14.

**За более подробной информацией просим обращаться по адресу:
107174, г. Москва, ул. Новая Басманная, д. 2; а/я 25, НПП «ВИГОР».
Тел./факс: (095) 262-85-35; e-mail: cevig@rambler.ru**



НЕДЕЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

10–13 апреля 2006 г. в выставочном центре «КиевЭкспоПлаза» проходила уже традиционная «Неделя промышленных технологий», объединяющая ряд международных специализированных выставок: «Элком Украина — энергетика, энергосбережение, электротехника», «Промышленное освещение», «Электроника и промышленная автоматизация», «Насосы. Компрессоры. Арматура», «Изобретения и инновации», а также выставки «Сварка. Родственные технологии» и «Трубопроводный транспорт», организаторами которых выступили НТК «ИЭС им. Е. О. Патона», а поддержку оказали Общество сварщиков Украины, НАК «Нафтогаз України», Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики, Ассоциация промышленного арматуростроения Украины, Ассоциация производителей и строителей полимерных трубопроводов. Все выставки Недели промышленных технологий получили поддержку Украинского союза промышленников и предпринимателей.

Всего в рамках экспозиции «Недели промышленных технологий» приняли участие свыше 600 компаний и фирм (на 26 % больше по сравнению с 2005 г.) из 23 стран мира — Украины, Австрии, Беларуси, Бельгии, Греции, Дании, Италии, Китайской Народной Республики, Македонии, Молдовы, Нидерландов, Польши, России, Румынии, Словакии, Соединенных Штатов Америки, Турции, Федеративной Республики Германии, Финляндии, Франции, Чешской Республики, Швейцарии и Швеции. Большое число иностранных участников (22 % общего количества) подтверждает динамику развития соответствующих отраслей, признание огромного научно-технического и промышленного потенциала Украины. Общая площадь выставок Недели выросла на 17 % и превысила 17500 кв. м.

Сварка. Родственные технологии

В выставке «Сварка. Родственные технологии» приняли участие свыше 50 организаций и фирм из Украины, России, Германии, Турции, украинские предста-

вительства фирм Швеции, Австрии, Польши. Среди участников выставки **ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ**, его опытные заводы по производству сварочных материалов и оборудования, украинские предприятия **КЗЭСО**, фирма «СЭЛМА», «СимЗ», «ДОНМЕТ», «НАВКОТЕХ», «Коммунар» и др., российские — «ГРПЗ», «Межгосметиз». Продукцию европейских компаний представляли фирмы «Фрониус-Украина», «Костолин-Украина», «Полисуд», представительство «ЭСАБ», «Askaymak»

Выставка продемонстрировала высокий интерес к ней со стороны учащихся технических училищ, студентов, специалистов, занятых в сварочном производстве различных отраслей промышленности, преподавателей и предпринимателей различных городов Украины, в меньшей мере из России, Беларуси, Германии.

Среди фирм — производителей сварочного оборудования и оборудования для смежных технологий выделяются три известных предприятия: Каховский завод сварочного оборудования (КЗЭСО), Опытный завод сварочного оборудования ИЭС им. Е. О. Патона, Фирма «СЭЛМА» (г. Симферополь). В разработках этих предприятий можно четко выделить две основные тенденции: совершенствование оборудования, которое уже освоено предприятиями, и создание новых видов оборудования.

Семинары

11 апреля состоялся научно-практический семинар «Повышение эксплуатационной надежности систем трубопроводного транспорта», организованный НТК «Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины», ДК «Укртрансгаз», Ассоциацией промышленного арматуростроения Украины и Украинским информационным центром «НАУКА. ТЕХНИКА. ТЕХНОЛОГИЯ» при поддержке НАК «Нефтегаз Украины». Семинар проводился в рамках выставки «Трубопроводный транспорт».

На семинаре обсуждались вопросы диагностики и модернизации технологического оборудования и ли-





нейных участков магистральных трубопроводов, мониторинга и паспортизации технического состояния систем трубопроводного транспорта, материалов для трубопроводов, строительства трубопроводов, технологии ремонта и восстановления, в том числе технологии сварки, наплавки, резки и термообработки, защиты металлических трубопроводов от коррозии, контроля качества, трубопроводной арматуры, охраны труда, нормативно-технической документации. К началу семинара был издан сборник докладов (общее количество докладов — 27). Большинство докладов было посвящено проблемам газотранспортной системы.

12 апреля состоялся научно-технический семинар «Сварка и родственные процессы в промышленности», организованный НТК «ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины», Обществом сварщиков Украины и Украинским информационным центром «НАУКА. ТЕХНИКА. ТЕХНОЛОГИЯ». В его работе приняли участие около 40 специалистов в области сварки и родственных технологий в основном из ИЭС им. Е. О. Патона и разных промышленных регионов Украины.

Открывая семинар, вице-президент Общества сварщиков Украины канд. техн. наук В. М. Илюшенко отметил, что сварка была и остается одним из важнейших технологических процессов в современном промыш-

ленном производстве. Работа семинара проходила в День космонавтики и это очень символично, так как многие помнят о той роли, которую сыграли сварщики в ракетостроении и освоении космоса.

В заключение следует отметить, что за четыре дня работы на выставке побывало около 3 тыс. представителей промышленных, государственных и коммерческих организаций, научных сотрудников разных НИИ, преподавателей университетов, техникумов и технических училищ, студентов и просто заинтересованных лиц. На протяжении всей выставки в огромном помещении выставочного комплекса, благодаря приветливости персонала, доброжелательности экспонентов, ярким и эффектно оформленным стендам и общему приподнятому настроению посетителям было по-настоящему тепло и уютно.

Именно на выставках закладываются основы взаимовыгодного сотрудничества между производителем и потребителем, именно здесь находят новых деловых партнеров и получают полезную и нужную информацию. Этому, несомненно, способствовала и выставка «Сварка. Родственные технологии».

*В. Н. Липодаев, А. А. Кайдалов, доктора техн. наук,
В. А. Лебедев, И. А. Рябцев, кандидаты техн. наук*



5-я НАЦИОНАЛЬНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ И ВЫСТАВКА «НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ И ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА»

10–14 апреля 2006 г., Киев

В очередной раз в столицу Украины — солнечный город Киев — на **5-ю Национальную научно-техническую конференцию и выставку «Неразрушающий контроль и техническая диагностика»** съехались специалисты по неразрушающему контролю, чтобы поделиться своими достижениями и обсудить проблемные вопросы в области НК и ТД.

Конференция проходила с 10 по 14 апреля 2006 г. в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАНУ (пленарные заседания) и в Выставочном центре «КиевЭкспоПлаза» (заседания научных секций).

Организаторы — Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики (УО НКТД) совместно с Национальной академией наук Украины, Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Госпотребстандарт Украины, Госпромгорнадзор МЧС Украины, ДК «Укртрансгаз», НАК «Нафтогаз Украины» при поддержке Международного комитета по неразрушающему контролю (ICNDT) и Европейской федерации по неразрушающему контролю (EFNDT).

Генеральный спонсор конференции — Ассоциация «ОКО», объединяющая компании «Ультракон-Сервис», «Промтрилад» и «УкрНИИ НК».

В конференции приняли участие представители Украины, Российской Федерации, Республики Беларусь, Молдовы, Германии и Великобритании — свыше 400

специалистов из приблизительно 190 организаций и предприятий, в т. ч. таких известных, как ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины (Киев), Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко НАН Украины (Львов), ГКБ «Южное» (Днепропетровск), Национальный авиационный университет (Киев), Национальный техничес-



Председатель УО НКТД проф. В. А. Троицкий (в центре) и его заместители: А. В. Мозговой (слева), проф. О. М. Карпаш (справа)



Проф. В. А. Троицкий вручает академику НАНУ Л. М. Лобанову диплом УО НКТД «За значительный вклад в развитие НК и ТД в Украине»

кий университет Украины «Киевский политехнический институт», Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Днепропетровский национальный университет, НИИ интроскопии МНПО «Спектр» (Москва), УкрНИИпроект (Киев), Киевский национальный университет им. Т. Г. Шевченко, МВТУ им. Н. Баумана (Москва), Институт сварки Великобритании (TWI Group), Институт неразрушающего контроля Фраунгоферовского Общества (Германия), компании, входящие в Ассоциацию «ОКО» (Киев) и многие другие научно-исследовательские организации, образовательные учреждения, ассоциации, объединения и фирмы, занимающиеся разработкой и внедрением методов и средств НК, а также промышленные предприятия.

На нынешнюю конференцию представлено более 100 докладов, тематика которых посвящена вопросам ультразвукового, акустико-эмиссионного, магнитного, вихретокового, капиллярного, радиационного, оптического, теплового методов НК, контролю герметичности, мониторингу технического состояния и оценке остаточного ресурса объектов при эксплуатации, стандартизации, сертификации и метрологического обеспечения в области НК и ТД и др. проблемам. Среди авторов такие известные ученые, как академик НАНУ Лобанов Л. М., чл.-корр. НАНУ Назарчук З. Т., проф. Кисиль И. С., проф. Белокур И. П., проф. Карпаш О. М., проф. Троицкий В. А., проф. Рыжиков В. Д. и др. ученые, а также специалисты, которые не имеют громких титулов, но вносят свой весомый вклад в развитие методов и средств НК.

Большинство из этих докладов были заслушаны на двух пленарных и семи секционных заседаниях, которые состоялись в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины и в конференц-залах ВЦ «КиевЭкспоПлаза».

По традиции, конференцию открыл заместитель директора ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины академик НАНУ Л. М. Лобанов, который поздравил участников с началом конференции и пожелал всем плодотворной работы. Затем с докладами о деятельности обществ неразрушающего контроля и технической диагностики Украины, России и Республики Беларусь выступили соответственно председатель УО НКТД проф. В. А. Троицкий, исполнительный директор РО НКТД профессор

Ю. К. Федосенко, исполнительный директор БАНКТД С. А. Попоудина.

Далее на пленарном заседании были заслушаны 11 научных докладов, выступления спонсоров конференции и участников выставки.

На конференции работали следующие секции:

- теория и практика физических методов контроля сварных конструкций, материалов и изделий;
- мониторинг технического состояния и оценка остаточного ресурса объектов при эксплуатации;
- неразрушающий контроль и техническая диагностика в нефтегазовой отрасли;
- вопросы стандартизации и сертификации в неразрушающем контроле и технической диагностике;
- неразрушающий контроль и техническая диагностика в авиации.

Параллельно с конференцией в ВЦ «КиевЭкспоПлаза» состоялась выставка приборов, материалов и средств для НК и ТД. Свои разработки, а также оборудование для контроля и диагностики ведущих зарубежных компаний представили: НПП «Вигор» (Москва), НПЦ «Диагностика и контроль» (Николаев), МП «Дисит» НАН Украины (Киев), ЧП «ДП-Тест» (Киев), УГПП «Изотоп» (Киев), ОКТЬ ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ (Киев), НТК «Институт монокристаллов» (Харьков), ООО «Интрон-Сэт» (Донецк), ООО «Карл Цейс» (Киев), ГП «Колоран» ИФХ НАН Украины (Киев), ООО «Кварц» (Харьков), ООО «Кром» (Днепропетровск), НПП «Машиностроение» (Днепропетровск), ООО «Олимпас Москва» (Москва), МЧТПП «ОНИКО» (Киев), НПФ «Промприлад» (Киев), ООО «Синтакс» (Харьков), Ассоциация «Спектр групп» (Москва), Компания «Сперанца» (Желтые Воды), НПФ «Специальные Научные Разработки» (Харьков), НПФ «Ультракон» (Киев), НПФ «Ультракон-Сервис» (Киев), УкрНИИ НК (Киев), ООО «Энергия-Трансвук» (Одесса).

Свои стенды на выставке имели Украинское и Российское общества неразрушающего контроля и технической диагностики.

В рамках 5-й Национальной конференции традиционно состоялась **Отчетно-выборная конференция Украинского общества НКТД**, на которой Правление Общества отчиталось о проведенной за трехлетний период работе; были вручены дипломы победителям и лауреатам Второго профессионального конкурса УО НКТД, который проводился с целью определения и популяризации достижений лучших ученых, специалистов, трудовых коллективов, лабораторий, фирм, предприятий и организаций, которые работают в области НКТД в Украине; награждены лучшие специалисты Украины, сделавшие значительный вклад в развитие НК и ТД в стране; избраны председатель (проф. В. А. Троицкий), заместители председателя (проф. О. М. Карпаш и А. В. Мозговой), ученый секретарь (А. Л. Шекеро) и члены Правления УО НКТД; определены основные задачи Общества на следующие три года.

*В. А. Цечаль,
руководитель ИИЦ ТК «Спецмонтаж»,
Киев*



11-а МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ «ЛЕОТЕСТ-2006» В СЛАВСЬКУ

З 13 по 17 лютого 2006 року в Карпатах в Славську Львівської області в одинадцять зібрались спеціалісти з неруйнівного контролю України та Росії на міжнародну науково-технічну конференцію «ЛЕОТЕСТ-2006». Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів».

Організатором цієї щорічної конференції виступили Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики, Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України (м. Львів), Івано-Франківський національний університет нафти і газу, Науково-виробнича фірма «Ультракон-Сервіс» (м. Київ), Науково-виробнича фірма «Спеціальні Наукові Розробки» (м. Харків), Центр «Леотест-Медіум» (м. Львів).

Відкрив Конференцію Голова Оргкомітету, керівник лабораторії ФМІ ім. Г. В. Карпенка, канд. техн. наук Учанін В. М.

Листом привітав учасників та організаторів конференції голова Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики проф. Троїцький В. О. Як і щороку, найбільшу кількість доповідей вивісни на суд колег науковці ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАНУ: В. М. Учанін, З. Т. Назарчук, В. Г. Рибачук, Б. С. Філюшин, Р. М. Джала, Л. П. Дикмаров, С. Ф. Савула, В. Л. Вербенець, О. Й. Винник, А. Р. Гайдук, П. М. Хлипняк, В. Р. Джала, Л. І. Капко, О. С. Левицький, А. Б. Лозинський, О. П. Остап, І. М. Андрейко, В. М. Учанін, Ю. В. Головатюк, О. Р. Берегуляк, Р. А. Воробель, І. М. Журавель, І. Б. Івасенко, Н. В. Опир, К. В. Сушик, І. І. Кириченко та науковці ДКБ «Південне» ім. М. К. Янгеля В. Г. Тихий, М. В. Хомченко, Ю. С. Ткаченко.

Як завжди, великий інтерес та цікаву дискусію викликали доповіді гостей з Санкт-Петербурга (ЛЕТІ та Асоціація «ТЕСТРОН») та Москви (НУЦ «Сварка і контроль» при МВТУ ім. Н. Э. Баумана): М. М. Єгорова, В. Г. Агузумцяна, М. О. Калініна, О. Г. Грудської, І. Е. Махова, С. В. Титова, К. Е. Тоома, П. Б. Стрелкова, Г. А. Бігуса, Н. О. Бистрової та ін.

Цього разу учасники конференції почули цікаву розповідь про розробки в галузі ультразвукового контролю зварних труб великого діаметру науковців ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАНУ В. Л. Найдю, А. О. Можухіна та І. Ф. Єфремова, А. П. Копилова — представників Віксунського металургійного заводу. Про тенденції розвитку систем для автоматизованого ультразвукового контролю поздовжніх зварних з'єднань труб.

Кілька доповідей представили співробітники університетів України, що свідчить про виконання наукових досліджень в навчальних закладах: О. М. Карнаш, І. І. Цюцяк, О. М. Карнаш, І. С. Кісіль, О. Ф. Козак (ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ); С. В. Серебряніков, О. І. Сіріков (КДТУ, м. Кіровоград); Т. І. Домінюк, І.

П. Микитин, Б. І. Стадник (НУ «Львівська політехніка»); В. Я. Прохоренко, С. В. Прохоренко, С. Ф. Філоненко, Р. Гузек, П. Легутко (НУ «Львівська політехніка», Національний авіаційний університет та Жешувський університет в Польщі).

Про свої дослідження в розробці дефектоскопів та автоматизованих установок розповіли представники ряду підприємств, що давно пропонують свою продукцію на ринку України: О. А. Никоненко (НВФ «Ультракон-Сервіс», м. Київ); О. М. Самусенко (Компанія «Сперанца», м. Жовті Води); А. В. Джаганян, Г. Г. Луценко, В. М. Учанін (НВФ «Ультракон-Сервіс», м. Київ); А. В. Свистун (НВФ «Ультракон-Сервіс», м. Київ); С. М. Галкін (Інститут сцинтиляційних матеріалів, м. Харків).

На «круглому столі» з проблем неруйнівного контролю присутніх зацікавили неформальні виступи керівників підрозділів НК підприємств України, що розповіли про основні завдання, вирішення яких дозволить значно підвищити якість продукції В. Г. Тихого (ДКБ «Південне» ім. М. К. Янгеля, м. Дніпропетровськ); Г. В. Варухи (ВО «Південмаш», м. Дніпропетровськ); С. А. Александрова (КБ «Івченко-Прогрес», м. Запоріжжя); В. Ю. Циганова (АТ «Мотор-Січ», м. Запоріжжя) та інші.

Доповіді конференції видані окремою збіркою, з питання придбання якої звертайтеся до Оргкомітету.

В холі конференц-залу проходила виставка засобів неруйнівного контролю та технічної діагностики. В ній брали участь:

- НВФ «Ультракон-Сервіс», м. Київ;
- НВФ «Промприлад», м. Київ;
- НВФ «ІНТРОН-СЕТ», м. Донецьк;
- Компанія «Сперанца», м. Жовті Води;
- ЗАТ «Тестрон», м. Санкт-Петербург;
- НУЦ «Контроль і сварка» при МГТУ ім. Н. Е. Баумана, м. Москва;
- Центр «Леотест-Медіум», м. Львів.

Конференція пройшла в діловій та доброзичливій атмосфері. Проживали учасники конференції в пансіонаті «Бойківщина», що розташований на околиці с. Славське в оточенні багаторічних сосен, ялин та смерек, поблизу гірськолижних трас.

Організатори конференції чекають на Вас і в наступному році, в середині лютого.

**Адреса Оргкомітету: 79017, м. Львів-17,
вул. Генерала Грицяя, 11/5
Тел./факс: (0322) 75-08-69;
e-mail: leotest@org.lviv.net**

*В. М. Учанін, ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАНУ
Ю. М. Посипайко, ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАНУ*



АНТК ИМЕНИ О. К. АНТОНОВА — ВЕДУЩИЙ ЦЕНТР НОВЕЙШИХ ТЕХНОЛОГИЙ

В этом году исполняется 60 лет со дня основания **Авиационного научно-технического комплекса им. О. К. Антонова**. Свои первые шаги АНТК сделал в 1946 г. как опытно-конструкторское бюро самолетостроения под руководством Главного конструктора **Олега Константиновича Антонова**. **К настоящему времени фирма является одним из передовых предприятий Украины, известном во всем мире**. Сегодня АНТК «Антонов» — это опытный коллектив, располагающий конструкторским бюро, лабораторно-испытательным комплексом, опытным заводом, летной испытательной базой и авиакомпанией по международным грузовым авиаперевозкам. За 60 лет здесь разработано более 100 типов и модификаций летательных аппаратов, основана школа создания транспортных самолетов. Именно здесь были созданы многоцелевой биплан **Ан-2**, первый в СССР специализированный военно-транспортный **Ан-8**, первый в мире широкофюзеляжный **Ан-22** «Антей», один из наиболее известных пассажирских самолетов **Ан-24**, славные многоцелевые семейства **Ан-74** и **Ан-32**, самолеты самой большой грузоподъемности в мире **Ан-124 «Руслан»** (рис. 1) и **Ан-225 «Мрия»** (рис. 2) и многие другие. В течение последнего десятилетия на воздушные трассы вышли легкие многоцелевые **Ан-38**, пассажирские турбовинтовые **Ан-140** и конвертируемые грузопассажирские **Ан-74ТК-300**. Завершается программа летных испытаний военно-транспортного самолета короткого взлета и посадки **Ан-70**, которому пока нет равных в мире, и регионального реактивного пассажирского самолета нового поколения **Ан-148** (рис. 3). Все эти машины воплощают в себе фирменный стиль «Ан», который можно определить как сочетание целесообразности, экономичности и надежности. Они производятся на десятках предприятий Украины и России, давая работу сотням тысяч человек. Кроме того, самолеты «Антонов» строятся в Иране, Польше, Китае. В отношениях с этими странами Украина выступает в роли экспортера «ноу-хау», передовых технологий и научных идей. Из 22 тысяч построенных «Анов» более 1,5 тысяч продано в 72 страны мира.

Создание самолетов такого уровня невозможно без применения новейших технологий, постоянного совершенствования методов проектирования и использования современного оборудования, причем во всех ключевых направлениях авиастроения.

Одним из таких направлений являются *аэродинамические исследования*. Благодаря наличию собственной аэродинамической трубы АТ-1 и образованного на ее основе аэродинамического комплекса АНТК им. О. К. Антонова в состоянии проводить полный цикл продувочных испытаний начиная от проектирования моделей и разработки экспериментального оборудования и заканчивая выдачей рекомендаций и заключений. За 35 лет работы аэродинамической трубы накоплен большой опыт проведения исследований не только в авиационных, но и во многих других направлениях.

Наряду с аэродинамическими характеристиками, другим важнейшим качеством самолета, от которого во многом зависит безопасность полета, является его *проч-*

ность. На АНТК им. О. К. Антонова разработаны достоверные методы обеспечения необходимой прочности и ресурса самолетных и других конструкций, подверженных как статическим, так и динамическим нагрузкам. Здесь работает один из крупнейших в Европе прочностных испытательных комплексов, где выполняются натурные сертификационные прочностные и усталостные испытания летательных аппаратов любого класса, от дельтапланов до гигантов типа «Руслан» и «Мрия».

Неотъемлемым звеном в обеспечении качества продукции на этапах проектирования, изготовления, испытаний, доработок под типовую конструкцию и эксплуатации самолетов «Ан» является *неразрушающий контроль*. Отдел неразрушающего контроля АНТК им. О. К. Антонова применяет новейшие технологии, позволяющие выявлять поверхностные и внутренние дефекты типа трещин, пор, раковин, непроваров, непропаев, расслоений, коррозионных поражений, измерять толщины деталей и покрытий, электропроводность и другие физические характеристики материалов, оценивать изменения геометрии контролируемого объекта. Среди методов неразрушающего контроля наиболее часто применяются: радиационный, акустический, магнитный, вихретоковый, капиллярный и визуально-оптический.

Современный самолет немыслим без широкого применения в нем конструкций из *полимерных композиционных материалов* (ПКМ), в создании и внедрении которых АНТК им. О. К. Антонова занимает лидирующее положение в отечественной авиационной промышленности с 1970-х годов и до настоящего времени. Эти конструкции на основе углеродных, стеклянных, органических и гибридных армирующих волокон по комплексу свойств в 2-3 раза превосходят металлические материалы. В процессе создания новых «Анов» из ПКМ формируются самые ответственные высоконагруженные агрегаты крыла и оперения самолета, средства механизации несущих поверхностей и значительная часть внешней обшивки самолета. Например, на Ан-70 из ПКМ сделаны киль, предкрылки и закрылки, элероны и интерцепторы, практически все обтекатели и зализы, створки грузолюка и многое другое. Объем при-



Рис. 1. «Руслан» — лидер мирового рынка воздушных перевозок тяжелых крупногабаритных грузов



Рис. 2. Ан-225 «Мрия» — транспортный самолет самой большой в мире грузоподъемности



Рис. 3. Два Ан-148 выполняют программу летных сертификационных испытаний

менения композитов в Ан-70 (рис. 4) достигает 25% от общей массы конструкции против 6% на «Руслане». Благодаря этому удалось достичь значительно более высокой транспортной и экономической эффективности самолета в целом.

Стремясь достичь максимального эффекта от разработанных новейших технологических процессов, специалисты АНТК постоянно расширяют сферу их применения. Так, более 10 лет назад на предприятии было положено начало такому виду деятельности, как *создание наземных видов транспорта*. Рациональное использование здесь авиационных технологий позволило придать созданным образцам высокие потребительские качества. Так, выпускаемые серийно троллейбусы «Ан» отличаются от аналогов меньшей массой, меньшим потреблением электроэнергии, намного более высокой коррозионной стойкостью и длительным сроком службы. По тем же принципам спроектирован и изготовлен кузов единственного в СНГ низкопольного трамвая.

Впечатляющим свидетельством роста технологических возможностей АНТК им. О. К. Антонова стали разработки в области *авиационно-космической тематики*. В последнее время завершены исследования нескольких проектов «летающих космодромов» на базе Ан-124 и Ан-225. Запуск с борта этих самолетов космических объектов позволяет добиться беспрецедентно широкого диапазона возможных углов наклона орбит и многократного снижения стоимости выведения полезной нагрузки. Сегодня совместно с предприятиями Российской Федерации на базе Ан-124 **реализуется программа космической системы «Воздушный старт»**.



Рис. 4. Военно-транспортный самолет короткого взлета и посадки Ан-70 в настоящее время не имеет аналогов в мире

На АНТК им. О. К. Антонова системно в соответствии с конкретными программами повышения технического уровня самолетов «Антонов» развиваются практически все технологические направления в авиационной промышленности.

Интегрирующим звеном в этом сложном процессе выступают *современные компьютерные информационные технологии* (КИТ). Стратегия их применения предусматривает разработку и реализацию на АНТК и на предприятиях-партнерах технологии полного электронного определения изделия и параллельного инжиниринга, основанного на трехмерном моделировании и создании интегрированной базы данных проекта. Уже сегодня на фирме сданы в эксплуатацию несколько конструкторских залов компьютерного моделирования, оснащенных новейшими компьютерными станциями, введены в строй серверы и ядро вычислительной сети, внедрены современные системы автоматизированного проектирования. Организована система обучения конструкторов и технологов, разрабатывается программа обучения работы с КИТ для всех категорий специалистов. Внедрение КИТ обеспечивает повышение качества и оперативную реализацию запросов заказчика при создании и модификации изделий, а также позволяет АНТК участвовать в совместных международных авиационных проектах.

Первым самолетом, полностью разработанным на основе трехмерного компьютерного проектирования, стал региональный реактивный Ан-148 (см. рис. 3). Применение КИТ позволило значительно уменьшить трудоемкость разработки агрегатов и отдельных элементов самолета.

Не только широкие технологические возможности, но и бесценный интеллектуальный потенциал, корпоративная культура, традиционный творческий дух и развитая научно-техническая инфраструктура вселяют уверенность в том, что и в будущем изделия с маркой «Ан» будут воплощать в себе наиболее значимые достижения науки и техники. Достижения и возможности АНТК им. О. К. Антонова получили высокую оценку и на государственном уровне. Президент Украины В. А. Ющенко в своем обращении к коллективу предприятия, в частности, отметил: *«Славная марка «Антонов» укрепляет авторитет Украины как самолетостроительной державы. Уверен, что последователи Олега Антонова и в дальнейшем будут достойно продолжать его дело, содействуя наращиванию производства высокотехнологической продукции, усилению приоритетных позиций отечественного авиастроения»*.

**ПОЗДРАВЛЯЕМ ЮБИЛЯРА!****ВИТАЛИЮ АЛЕКСАНДРОВИЧУ ПРОТОПОПОВУ — 60**

27 апреля 2006 г. исполнилось 60 лет со дня рождения Виталия Александровича Протопопова, кандидата технических наук, начальника отдела неразрушающих методов контроля Украинского научно-исследовательского института технологии машиностроения (ОАО «УкрНИИТМ»).

В 1969 г. Виталий Александрович закончил Днепропетровский государственный университет по специальности «Электроника и радиофизика» и был направлен по назначению в НИИ технологии машиностроения, где работает и в настоящее время.

Пройдя путь от инженера до старшего научного сотрудника, он возглавил отдел по разработке и внедрению средств и методов неразрушающего контроля.

В 1993 г. В. А. Протопопов без отрыва от производства защитил диссертацию по теме «Ультразвуковые эхо-импульсные средства измерения толщины металлоконструкций ракетно-космической техники сложной формы».

Значение работ кандидата технических наук В. А. Протопопова для теории и практики неразрушающего контроля определяется установлением им зависимостей, которые позволяют обоснованно подойти к разработке и внедрению ручных и автоматизированных средств измерения толщины металлоконструкций и средств контроля для дефектоскопии многослойных конструкций, включая конструкции из полимерных композиционных материалов.

На основании этих исследований и разработок впервые в практике ракетно-космического производства СССР созданы и внедрены следующие основные типы средств контроля: многоканальные средства автоматизированного ультразвукового контроля толщины крупногабаритных изделий из металла; системы активного контроля толщины в процессе механической и электрохимической обработки крупногабаритных изделий из металла; высокоточные измерители толщины металлов; дефек-

тоскопы для контроля изделий из композиционных полимерных материалов.

Все это позволило обеспечить существенное снижение допусков по толщине и стабилизацию массы изделий.

Разработанные средства контроля обеспечивают измерения толщины при серийном выпуске ракетно-космических систем типа «Зенит», «Днепр», «Протон», «Мир», «Циклон» и других аналогичных по назначению систем, в том числе: в производство на ряде машиностроительных предприятий Украины, стран СНГ, а также в США и Китае.

В настоящее время В. А. Протопопов руководит работами и принимает непосредственное участие в их реализации по разработке преобразователей, автоматизированных средств дефектоскопии и толщинометрии для машиностроительной и металлургической промышленности.

Новизна, эффективность и высокий научно-технический уровень разработок, которые выполнены с участием и под его руководством, подтверждены 25 авторскими свидетельствами СССР и патентами Украины.

Виталий Александрович щедро делится своими знаниями и опытом с молодежью: он является координатором секции «Испытания летательных аппаратов и их систем. Методы неразрушающего контроля» Международной молодежной научно-практической конференции «Человек и космос», которая проводится на базе Национального центра аэрокосмического образования молодежи Днепропетровского национального университета и Украинского НИИ технологии машиностроения в г. Днепропетровске.

За ряд работ и личный вклад в развитие технологии производства ракетно-космической техники В. А. Протопопов отмечен медалью имени академика М. К. Янгеля, знаком «Почетный работник космической отрасли» Национального космического агентства Украины, Почетной грамотой Федерации космонавтики Российской Федерации.

Коллеги, друзья и ученики сердечно поздравляют Виталия Александровича с юбилеем и от всей души желают ему крепкого здоровья, бодрости и новых успехов!

**ІЗОТОП**

КОМПЛЕКСНЫЕ ПОСТАВКИ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ТРУБОПРОВОДОВ И СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ:

- рентгеновские аппараты серии "АРИНА", "САРМА", "РАТМИР" и др.;
- рентгеновская пленка, химреактивы и проявочная техника AGFA NDT;
- расходные материалы для капиллярной, и магнитопорошковой дефектоскопии ARDROX;
- принадлежности для радиографии



03680, ГСП, г. Киев, ул. Горького, 152, тел./факс: (044) 528-90-00
E-mail: ndt@izotop.kiev.ua



НАУКОВО-ВИРОБНИЧА ФІРМА «ПРОМСЕРВІСДІАГНОСТИКА»

Тел./факс: (044) 200-88-13 ❖ Тел.: (044) 200-84-74 ❖ E-mail: promsdiag@ukr.net

Наша фірма на протязі багатьох років, використовуючи власну матеріальну базу та сучасні методи неруйнівного та руйнівного контролю й оцінки результатів випробувань, проводить роботи з неруйнівного та руйнівного контролю, технічного діагностування та чергового і позачергового технічного огляду посудин, що працюють під тиском, в тому числі цистерн; резервуарів для зберігання нафти та нафтопродуктів; вантажопідіймальних механізмів; парових і водогрійних котлів, трубопроводів пари та гарячої води; технологічного обладнання та трубопроводів хімічних, нафтохімічних та нафтогазопереробних виробництв; систем газопостачання; АГНКС; магістральних газо- та нафтопроводів; криогенного обладнання; несучих та огорожуючих конструкцій (Дозволи на продовження робіт № 1447.04.30-74.30.0; 1894.0430-74.30.0; 1930.04.30-74.30.0; П46.05.30-74.30.0 Держнаглядохоронпраці України та Ліцензія Держбуду України № 105368 від 7 червня 2005 р.).

Нашою фірмою розроблено комплекс акустично-емісійного контролю об'єктів підвищеної небезпеки Міністерства політики України «АКОРД», що пройшов державні випробування та метрологічну атестацію в 2005 р. і є значно дешевшим за аналоги зарубіжного виробництва.

Ми тісно співпрацюємо з фахівцями ІЄЗ ім Є. О. Патона НАН України та іншими субпідрядниками і за час діяльності провели спільно з ними дослідження характеру розшарувань газових сепараторів; дослідження причин руйнування підземних магістральних трубопроводів, посудин, що працюють під тиском з технологічними об'язками, резервуарів для зберігання нафти та нафтопродуктів, технологічного обладнання, газорозподільних станцій ВАТ «Укрнафта» (НГВУ «Охтирканафтогаз»), ДП «Харківтрансгаз» та інших підприємств, виявили десятки одиниць обладнання, що мало небезпечні дефекти і усунули їх.

При виникненні у Вас пропозицій щодо неруйнівного та руйнівного контролю, технічного діагностування, технічного огляду (опосвідчення) названих вище об'єктів, придбання комплексу акустично-емісійного контролю ми готові до співпраці.



ОАО «ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ «УКРЭНЕРГОЧЕРМЕТ»

УЧЕБНЫЙ И АТТЕСТАЦИОННЫЙ ЦЕНТРЫ ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ

пр. Ленина, 58, г. Харьков, 61072
 тел. (057) 763-03-26, 763-03-27, 763-03-23; факс (057) 340-44-40
 E-mail: acnk@energochermet.com, http://www.ndt-vostok.com.ua

ПРОВОДЯТ ПОДГОТОВКУ И АТТЕСТАЦИЮ СПЕЦИАЛИСТОВ ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ:

- ◆ на I, II и III уровень квалификации согласно требований Международного стандарта ДСТУ EN 473-2001 «Квалификация и сертификация персонала в области неразрушающего контроля»;
- ◆ на I и II уровень квалификации в соответствии с Правилами ДНАОП 0.00-1.27-97 «Правила аттестации специалистов по неразрушающему контролю».

ПО СЛЕДУЮЩИМ МЕТОДАМ НК:

- | | |
|-----------------------|-----------------------------|
| ✓ Радиационный (RT)* | ✓ Капиллярный (РТ) |
| ✓ Ультразвуковой (УТ) | ✓ Визуально-оптический (ВТ) |
| ✓ Магнитный (МТ) | |

* - аттестация только согласно ДНАОП 0.00-1.27-97

Компетентность Учебного и Аттестационного центров подтверждена аудитом **Немецкого головного органа по аккредитации (TGA)**.

Преподавательский состав, экзаменаторы и аттестационные комиссии центров укомплектованы высококвалифицированными специалистами по НК, имеющими II и III уровень квалификации по НК и аттестованными в соответствии с международными нормами.

Учебный и Аттестационный центры оснащены современными приборами и оборудованием, национальной и европейской нормативно-технической и методической базой по неразрушающему контролю.

Свидетельство об аккредитации DAR TGA (Германия) регистрационный №TGA-ZP-06-98-70.

Сертификат компетентности Органа по сертификации персонала Ассоциации «Укрэксперт» №01.ОСП.05.ЕН

Разрешения Органа по сертификации персонала Ассоциации «Укрэксперт» №001.ОСП.03.А №002.ОСП.03.У

ГП «АТТЕСТАЦИОННЫЙ ЦЕНТР НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ» ПРИ ИНСТИТУТЕ ЭЛЕКТРОСВАРКИ ИМ. Е. О. ПАТОНА НАН УКРАИНЫ

ПРОВОДИТ



неразрушающий контроль (визуально-измерительный, ультразвуковой, радиационный, капиллярный, магнитопорошковый, контроль герметичности); техническое диагностирование и техническое освидетельствование следующего оборудования:

- ✦ металлоконструкций и строительных конструкций
- ✦ паровых и водогрейных котлов
- ✦ сосудов, работающих под давлением
- ✦ трубопроводов пара и горячей воды
- ✦ грунтоподъемных кранов
- ✦ технологических трубопроводов и оборудования
- ✦ магистральных трубопроводов
- ✦ резервуаров для хранения нефтепродуктов
(Разрешение на начало работ № 32.03.30-31.62.3)

АТТЕСТУЕТ

специалистов неразрушающего контроля по следующим методам:

- ✦ визуально-оптическому
- ✦ ультразвуковому
- ✦ радиационному
- ✦ магнитопорошковому
- ✦ капиллярному
- ✦ контролю герметичности



ИЗГОТАВЛИВАЕТ

стандартные образцы предприятия с зарубками, боковыми и плоскостными сверлениями в соответствии с требованиями нормативных документов

03680, г. Киев-150, ГСП, ул. Боженко, 17
 Тел.: (044) 200-81-83; 490-71-19



ПОДПИСКА – 2006 на журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»

Стоимость подписки через редакцию*	Украина		Россия		Страны Дальнего зарубежья	
	на полугодие	на год	на полугодие	на год	на полугодие	на год
	50 грн.	100 грн.	480 руб.	960 руб.	26 долл. США	52 долл. США
*В стоимость подписки включена доставка заказной бандеролью.						

Если Вас заинтересовало наше предложение, заполните, пожалуйста, купон и отправьте заявку по факсу или электронной почте.

Телефоны и факсы редакции журнала «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»: тел.: (38044) 271-23-90, 271-24-03, 529-26-23, факс: (38044) 528-34-84, 529-26-23.

ПОДПИСНОЙ КУПОН

Адрес для доставки журнала _____

Срок подписки с _____

200 г. по

200 г. включительно

Фамилия И. О. _____

Компания _____

Должность _____

Тел., факс, E-mail _____

Подписку на журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» можно оформить также: в Украине: подписные агентства «Пресса», «Идея», «Саммит», «Прессцентр», KSS, «Блиц-Информ»; в России: подписные агентства «Роспечать», Пресса России.

РЕКЛАМА в журнале «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»

Обложка наружная, полноцветная

Первая страница обложки (190×190 мм) — 500 \$

Вторая страница обложки (200×290 мм) — 350 \$

Третья страница обложки (200×290 мм) — 350 \$

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

Обложка внутренняя, полноцветная

Первая страница обложки (200×290 мм) — 350 \$

Вторая страница обложки (200×290 мм) — 350 \$

Третья страница обложки (200×290 мм) — 350 \$

Четвертая страница обложки

Четвертая страница обложки (200×290 мм) — 350 \$

Внутренняя вставка

Полноцветная (200×290 мм) — 300 \$

Полноцветная (разворот А3) (400×290 мм) — 500 \$

Полноцветная (200×145 мм) 150 \$

Черно-белая (170×250 мм) — 80 \$

Черно-белая (170×125 мм) — 50 \$

Черно-белая (80×80 мм) — 15 \$

• Оплата в гривнях или рублях РФ по официальному курсу.

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

• Статья на правах рекламы — 50% стоимости рекламной площади.

• При заключении рекламных контрактов на сумму, превышающую 1000 \$,

предусмотрена гибкая система скидок.

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 5.0

• Изображения в формате TIFF, цветовая модель CMYK, разрешение 300 dpi.

Подписано к печати 22.05.2006. Формат 60×84/8. Офсетная печать. Усл. печ. л. 7,8. Усл. кр.-отт. 8,3. Уч.-изд. л. 8,9 + 1 цв. вклейка. Цена договорная.