

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

№ 2, 2004

Издается с января 1989 г.

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. Ключев,
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) 261-58-81,
Факс: (044) 268-34-84, 269-26-23
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. В. Петушков

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

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА

- БУРАУ Н. И., ЗАЖИЦКИЙ А. В., СОПИЛКА Ю. В.* Распознавание
состояния объекта виброакустической диагностики по результатам
многомерного спектрального анализа 3
- РАБКИНА М. Д.* Результаты технического диагностирования печных
змеевиков установок каталитического риформинга и гидроочистки
нефтепродуктов 9

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

- КАРПАШ О. М., МОЛОДЕЦКИЙ И. А., КАРПАШ М. О.* Общий
обзор методов оценки физико-механических характеристик метал-
лов 18
- ИГУМЕНЦЕВ Е. А., ПРОКОПЕНКО Е. А., МАРЧУК Я. С.* Нормирование
вибрации газоперекачивающих агрегатов по результатам виброобс-
ледований 23
- МИХАЙЛОВ О. В., ТЕРЕХОВ П. В., КОНДАКОВ А. В.,
МУРАТОВ Д. Ш., ХАБИБУЛЛИН А. С.* Повышение чувствительности
регистрирующих материалов к жесткому излучению и снижение
времени их экспозиции в рентгенодефектоскопическом контроле ... 28
- ОВСЯНКИН А. М., ДЕМИДКО В. Г., ШКВАР Є. О.* Особливості
струминної обробки внутрішніх циліндричних поверхонь при
капілярному контролі 32
- ЛОПАТИН А. С., МАРКОВ А. М., СМИРНОВ В. А., ХРИСТЕН-
ЗЕН В. Л.* Обоснование диагностических признаков дисбаланса
роторов 36
- ЧАБАНОВ В. Е., ГОРДЕЛИЙ В. И.* Наклонные электромагнитно-
акустические преобразователи и анализ их работы 40
- ГРЕБЕННИКОВ В. Н., МАНОРИК П. А., ШУЛЬЖЕНКО А. В.,
СИДОРОВА Н. А.* Твердотельный химический сенсор на основе
бромтимолового синего индикатора для оптических измерителей
концентрации аммиака 46

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

- КОВАЛЕНКО В. А., ДУДНИК В. А., КОВАЛЕНКО Ж. И.* Определение
геометрических параметров козлового крана после реконструкции
и монтажа 50

ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ

- ГОРДЕЛИЙ В. И., ЛЕЩЕНКО Н. Г.* Программно-аппаратный комп-
лекс УД-ЭМА-PCП 55

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, 2004

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. Ulitko, T. M. Shvets,
N. N. Zatsypin,
A. V. Shimanovsky

Address:

The E. O. Paton Electric
Welding Institute
of the NAS of Ukraine,
11 Bozhenko str., 03680,
Kyiv, Ukraine
Tel.: (38044) 261-58-81,
Fax: (38044) 261-34-03, 269-26-23
E-mail: journal@paton.kiev.ua
tp://www.nas.gov.ua/pwj

Scientific editors:

N. G. Bely, A. A. Gruzd

Electron galley:

I. R. Naumova, L. N. Gerasimenko,
I. V. Petushkov

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

TECHNICAL DIAGNOSTICS

- BURAU N. I., ZAZHITSKY A. V., SOPILKA Yu. V.* Identifying the condition of the object of vibroacoustic diagnostics by the results of multivariate spectral analysis 3
RABKINA M. D. Results of technical diagnostics of furnace coils in installations of catalytic reforming 9

NON-DESTRUCTIVE TESTING

- KARPASH O. M., MOLODETSKY I. A., KARPASH M. O.* General review of the methods of evaluation of physico-mechanical characteristics of metals 18
IGUMENTASEV E. A., PROKOPENKO E. A., MARCHUK YA. S. General review of the methods of evaluation of physico-mechanical characteristics of metals 23
MIKHAILOV O. V., TEREKHOV V. P., KONDAKOVA A. V., MURATOV D. Sh., KHABIBULINA A. Increase of the sensitivity of recording materials to hard radiation and reducing the time of their exposure in X-ray inspection 28
OVSYANKIN A. M., DEMIDKO V. G., SHKVAR E. O. Features of jet treatment of internal cylindrical surfaces in capillary control 32
LOPATIN A. S., MARKOV A. M., SMIRNOV V. A., KHRISTENSEN V. L. Substantiation of diagnostic features of rotor disbalance 36
CHABANOV V. E., GORDELII V. I. Angle-beam electromagnetoacoustic transducers and analysis of their operation 40
GREBENNIKOV V. N., MANORIK P. A., SHULGENKO A. V., SIDOROVA N. A. Solid-state chemical sensor based on bromthymol blue indicator for optical measuring instruments of ammonia concentration 46

INDUSTRIAL

- KOVALENKO V. A., DUDNIK V. A., KOVALNEKO Zh. I.* Determination of geometrical parameters of a gantry crane after reconstruction and mounting 50

NEWS AND INFORMATION

- GORDELII V. I., LESHCHENKO N. G.* Hardware complex UD-EMA-RSP 55

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



РАСПОЗНАВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТА ВИБРОАКУСТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МНОГОМЕРНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Н. И. БУРАУ, А. В. ЗАЖИЦКИЙ, Ю. В. СОПИЛКА

Рассматривается задача классификации состояния роторных элементов газотурбинного двигателя при их стационарном вибрационном возбуждении в процессе виброакустической диагностики малой усталостной трещины одного из элементов. В качестве диагностической информации используются результаты биспектрального анализа виброакустических сигналов. Задача классификации решается на основе использования искусственных нейронных сетей.

Decision making problem is analyzed for the rotary elements of the gas-turbine engine at the stationary vibration excitation in the process of vibroacoustical diagnosis of small fatigue crack of the element. The results of bispectral analysis of the vibroacoustical signals are used as a diagnosis information. The neural networks are used for classification problem decision.

В настоящее время в отечественной и зарубежной практике эксплуатации авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) большое внимание уделяется вопросам разработки и использования эффективных методов и средств мониторинга технического состояния их критических узлов и элементов, которые в наибольшей степени ограничивают ресурс ГТД. К таким элементам относятся элементы рабочих колес авиационных двигателей, в частности, лопатки турбин и компрессоров, на которые приходится большая часть прочностных дефектов двигателя, имеющих вибрационное происхождение. Поэтому вибрационный и виброакустический мониторинг состояния элементов рабочих колес и диагностика зарождающихся в них прочностных дефектов позволяют избежать внезапного разрушения двигателя в эксплуатации и будут способствовать повышению надежности и более полному использованию его ресурсных возможностей.

Среди задач, которые решаются в процессе виброакустического мониторинга, важное место занимают обработка диагностической информации и распознавание по ее результатам состояния объекта диагностики (ОД). Для таких сложных объектов, к которым относится авиационный двигатель, специфика выбора методов обработки информации и выделения диагностических признаков определяется несколькими факторами. Наиболее важными из них являются множество стационарных и нестационарных вибрационных воздействий на элементы рабочих колес механического и аэродинамического происхождения, и, следовательно, сложная структура измеряемых сигналов, малые изменения их информативных составляющих, которые обусловлены зарождением и начальным развитием усталостной трещины при значительных уровнях аддитивных и мультипликативных помех. Имеют место также ограничения по разрешающей способности многих методов обработки информации и по возможности их использования для обработки локально или существенно нестационарных сигналов. С учетом этого в работе [1] пред-

ложены наиболее эффективные для решения поставленной задачи методы обработки диагностической информации и на их основе сформированы пространства диагностических признаков для стационарных и нестационарных режимов эксплуатации авиационного двигателя.

Среди предложенных методов обработки целесообразно выделить многомерный спектральный анализ, который в обобщенном виде базируется на использовании статистических характеристик высших порядков [1–3]. При решении поставленной задачи этот метод имеет существенные преимущества по сравнению с традиционными спектрально-корреляционными методами обработки информации. Спектральные характеристики высших порядков (биспектры, триспектры, функции бикогерентности и др.) обладают свойством ослабления влияния шумов на диагностические признаки, особенно, если обрабатываемый сигнал представляет собой аддитивную смесь негауссового процесса с гауссовым шумом, позволяют выделить статистически связанные части спектра, определить наличие комбинационных и модуляционных частот, а также обнаружить фазовые изменения между кратными частотными компонентами сигнала. Так как зарождение и развитие усталостной трещины в лопатке приводит к отклонению характеристики восстанавливающей силы от линейной зависимости, то излучаемые при функционировании рабочим колесом акустические сигналы будут нелинейными, и доказать наличие нелинейности, а также выделить обусловленные ею изменения в измеренных сигналах становится возможным при использовании статистических и спектральных характеристик высших порядков.

Распознавание состояния объекта диагностики по выделенным на этапе обработки информации диагностическим признакам представляет собой конечную процедуру диагностического процесса, от результатов проведения которой будет зависеть достоверность и точность диагностики в целом, а также решение о возможности дальнейшей экс-



плутации объекта. При построении автоматической системы виброакустического мониторинга процедура распознавания может быть выполнена с использованием методов искусственного интеллекта, в частности, самообучающихся структур на основе искусственных нейронных сетей, которые в настоящее время получают все большее распространение в задачах диагностики авиационных ГТД [4–6].

Целью данной статьи является анализ эффективности использования спектральных характеристик высших порядков и распознавание с использованием нейронных сетей состояния элементов рабочего колеса в задачах мониторинга и диагностики усталостной трещины в лопатке рабочего колеса авиационного двигателя на стационарных режимах эксплуатации.

Многомерный спектральный анализ. Как известно, спектральная плотность стационарного процесса $x(n)$ формально определяется путем преобразования Фурье автокорреляционной последовательности (АКП) или автокорреляционной функции (АКФ) процесса [7]. Естественным обобщением АКФ являются моменты высших порядков, а специфические нелинейные комбинации этих моментов представляют собой кумулянты.

Кумулянтom первого порядка стационарного процесса является его среднее значение (СЗ), кумулянты высших порядков являются инвариантными к изменению СЗ, поэтому их принято определять для процессов с нулевыми СЗ в соответствии с выражениями [8]:

$$C_{2x}(k) = E \{x^*(n) x(n+k)\}, \quad (1)$$

$$C_{3x}(k, l) = E \{x^*(n) x(n+k) x(n+l)\}, \quad (2)$$

$$C_{4x}(k, l, m) = E \{x^*(n) x(n+k) x(n+l) x^*(n+m)\} - C_{2x}(k) C_{2x}(l-m) - C_{2x}(l) C_{2x}(k-m) - M_{2x}^*(m) M_{2x}(k-l), \quad (3)$$

где $E\{\bullet\}$ обозначает усреднение по ансамблю; * — знак сопряжения; $M_{2x}(m) = E\{x(n)x(n+m)\} = C_{2x}(m)$ для вещественных процессов.

В соответствии с (1) АКФ является кумулянтom второго порядка.

Спектральные характеристики высших порядков определяются с помощью преобразования Фурье соответствующих кумулянтom:

$$S_{2x}(f) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_{2x}(k) \exp(-j2\pi f k), \quad (4)$$

$$S_{3x}(f_1, f_2) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} C_{3x}(k, l) \exp(-j2\pi f_1 k) \exp(-j2\pi f_2 l), \quad (5)$$

$$S_{4x}(f_1, f_2, f_3) = \sum_{k, l, m=-\infty}^{\infty} C_{4x}(k, l, m) \times \exp(-j2\pi f_1 k) \exp(-j2\pi f_2 l) \exp(-j2\pi f_3 m) \quad (6)$$

и соответственно представляют собой спектральную плотность (4), функцию двух частот — биспектр (5) и функцию трех частот — триспектр (6). Причем, в то время, как спектральная плотность является действительной неотрицательной величи-

ной, биспектр и триспектр — комплексные величины.

В задачах диагностики и неразрушающего контроля распространение получили коэффициенты асимметрии и эксцесса — нормализованные величины, определяемые из выражений (2) и (3), которые инвариантны по отношению к перемещению и масштабу и характеризуют отклонение анализируемого процесса от симметричного и нормального распределения. Спектральные характеристики высших порядков наиболее целесообразно использовать для обработки сложных нелинейных процессов, представляющих собой аддитивную смесь негауссовых сигналов с гауссовым шумом [2, 3], что является характерным для виброакустических процессов, которые протекают в авиационном двигателе при его эксплуатации.

Для исследования эффективности многомерного спектрального анализа в задаче виброакустической диагностики малой усталостной трещины в лопатке рабочего колеса авиационного двигателя было проведено моделирование виброакустических сигналов на выходе модели рабочего колеса, содержащего 21 лопатку при стационарном вибрационном возбуждении $P(t)$ колеса с частотой вращения ротора $f_p = 250$ Гц. В качестве моделей бездефектных лопаток использовалась модель линейной колебательной системы с собственной частотой $f^* = 600$ Гц. Модель дефектной лопатки (с малой поверхностной усталостной трещиной) задавалась моделью колебательной системы с кусочно-линейной характеристикой восстанавливающей силы, импульсная характеристика которой имеет представление в виде разложения в ряд Фурье по гармоникам основной частоты модели лопатки с трещиной f_0 [1]. В качестве обобщенного параметра трещины принимается относительное изменение жесткости на полуциклах деформирования ϑ , которое при моделировании изменялось в пределах 0,005, ..., 0,1. На выходе рабочего колеса сигнал получен путем свертки входного сигнала $P(t)$ (стационарное вибрационное возбуждение) с определяемой в соответствии с [9] импульсной характеристикой колеса $G(t, \tau)$, которая для каждого дискретного отсчета вычисляется по выражению:

$$y_j = \Delta T \sum_{\mu=1}^j G_{j-\mu+1} P_{\mu},$$

где ΔT — период дискретизации; j — номер дискретного отсчета.

Моделирование проводилось на временном интервале 1 с с периодом дискретизации $\Delta T = 2 \cdot 10^{-4}$ с, обеспечивая общее количество точек $N = 5000$. Для обработки использовались смоделированные на выходе колеса сигналы, а также аддитивная смесь этих сигналов и стационарного гауссова шума, моделирование которого проведено с использованием генератора случайных чисел с соответствующими коэффициентами для обеспечения значения отношения сигнал/шум $\rho = 10^1, \dots, 10^5$.

Биспектральная обработка полученных сигналов проводилась для случая рабочего колеса с

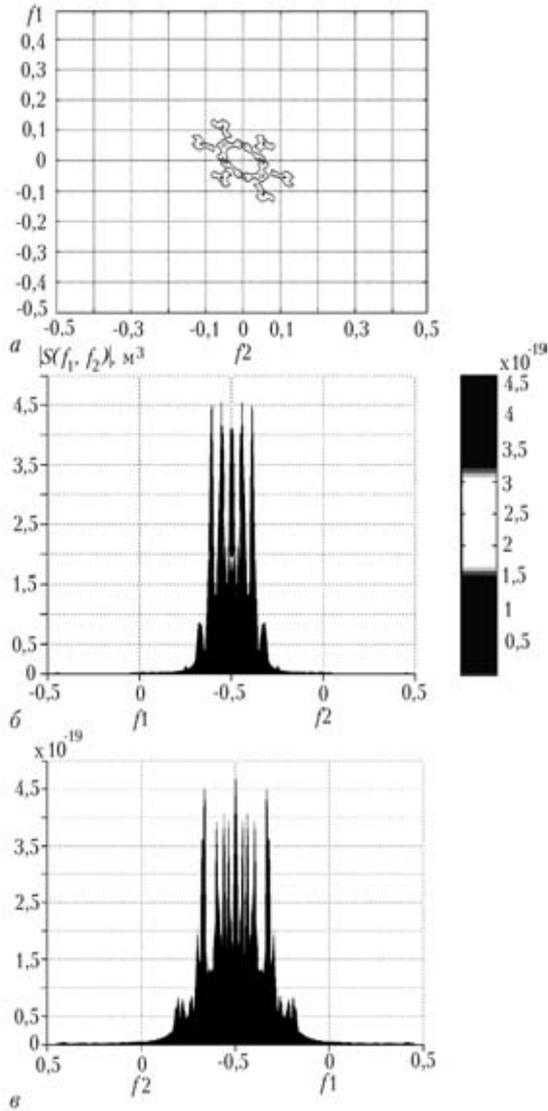


Рис. 1. Результат биспектральной обработки для $\vartheta = 0$, $\rho = 10^2$; а – контурное изображение; б, в – диагональные разрезы

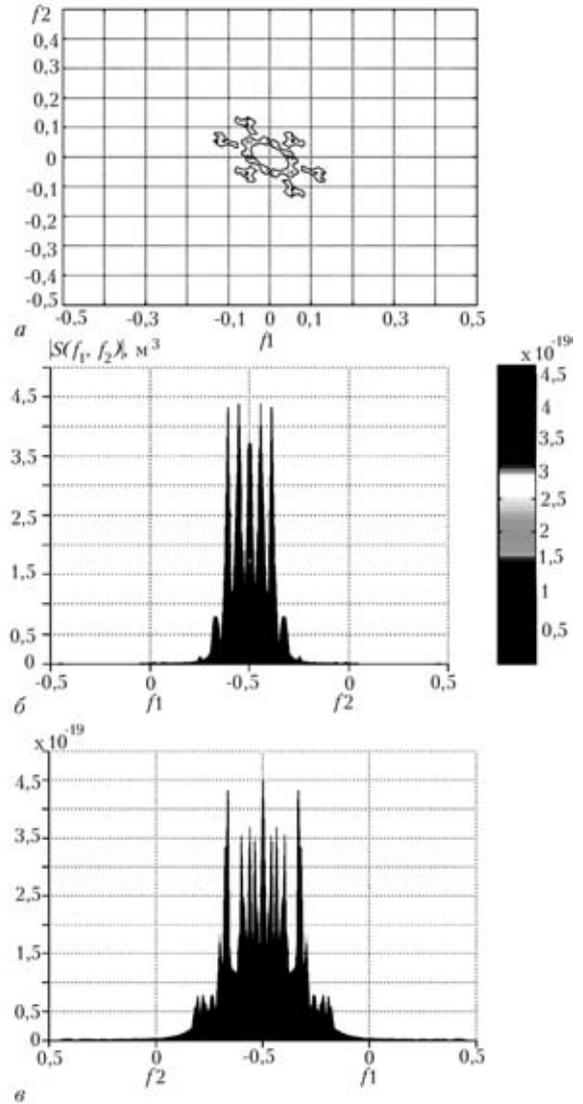


Рис. 2. Результат биспектральной обработки для $\vartheta = 0,05$, $\rho = 10^2$; а – контурное изображение; б, в – диагональные разрезы

бездефектными лопатками и при наличии трещины в одной из лопаток с указанным выше диапазоном значений параметра трещины. Примеры полученных оценок модулей биспектров как функций двух частот f_1 и f_2 , приведены на рис. 1 (без дефектов) и рис. 2 (с трещиной, $\vartheta = 0,05$). Контурные изображения являются полноцветными и представляют собой совокупность линий определенной конфигурации, отражающих одинаковые уровни представления полученных оценок. Полученное для описанных выше условий моделирования множество изображений имеет отличия как по уровню интенсивности (отличия в цветовой гамме), так и по геометрии линий одинаковых уровней, однако все изображения являются симметричными относительно их диагоналей. Диагональные разрезы являются удобным представлением полученных результатов для дальнейшего анализа и выделения диагностических признаков.

Как показали результаты обработки диагностической информации, появление и развитие усталостной трещины в лопатке рабочего колеса двигателя приводит к изменению интенсивности гло-

бальных и локальных экстремумов модулей биспектральных оценок, значения которых достаточно просто определяются по диагональным разрезам. Аддитивный гауссов шум в целом незначительно влияет на интенсивность глобальных максимумов (уменьшение не более 4 %) и в большей степени – на значения локальных максимумов (увеличение на 12 %), кроме этого появляются дополнительные составляющие, которые в общем случае мало влияют на информативность полученных оценок. Влияние значения обобщенного параметра трещины ϑ на полученные биспектральные оценки иллюстрируются приведенными в таблице относительными значениями усредненных интенсивностей глобальных I_g/I_g^* и локальных I_l/I_l^* максимумов, а также отношением значений экстремумов I_g/I_l , где $I_{g(l)}$ и $I_{g(l)}^*$ – значения диагностических признаков соответственно при наличии и отсутствии трещины.

Как видно из представленных в таблице результатов, изменения диагностических признаков при зарождении и начальном развитии трещины

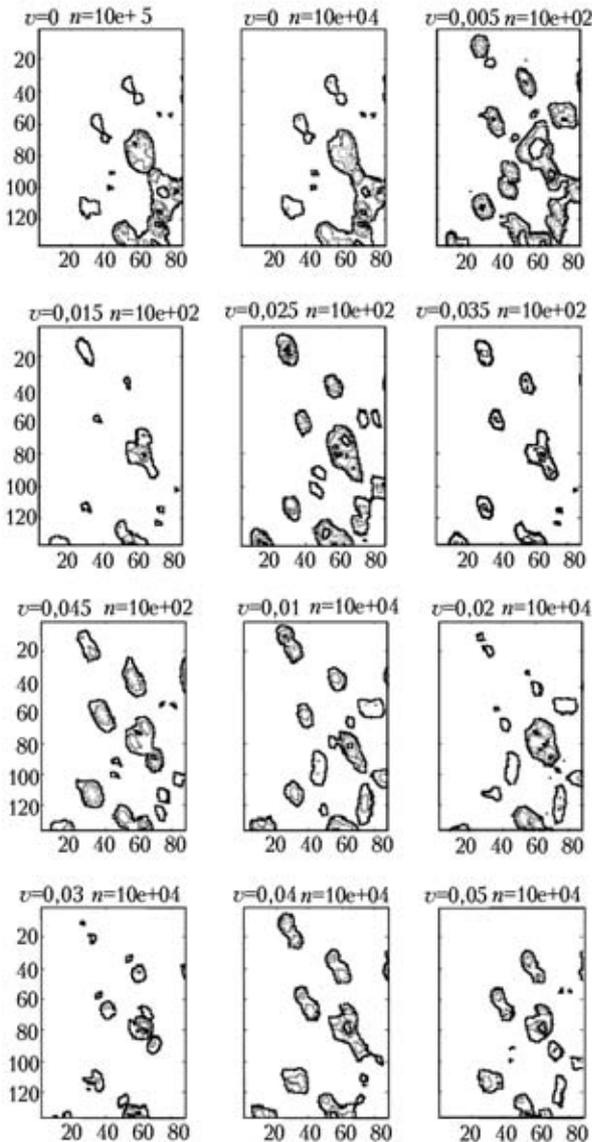


Рис. 3. Обучающее множество палитровых образцов

($\vartheta < 0,07$) имеют нерегулярный характер. Наиболее чувствительным к изменению параметра трещины является отношение значений экстремумов I_g/I_l модуля биспектра.

Распознавание состояния объекта диагностики по результатам многомерного спектрального анализа. Для распознавания с использованием нейронных сетей состояния объекта диагностики по результатам проведенной обработки диагностической информации целесообразно использовать контурные изображения биспектральных оценок. В целях экономии вычислительных ресурсов ПЭВМ было проведено предварительное преобразование изображений, а именно, полноцветные изображения преобразованы в палитровые (градации цвета от черного до белого), после чего каждое изображение было представлено одним сектором путем его диагональных разрезов. Для использования полученных изображений в качестве исходной информации на входе нейронной сети изображения были представлены числовыми матрицами, эле-

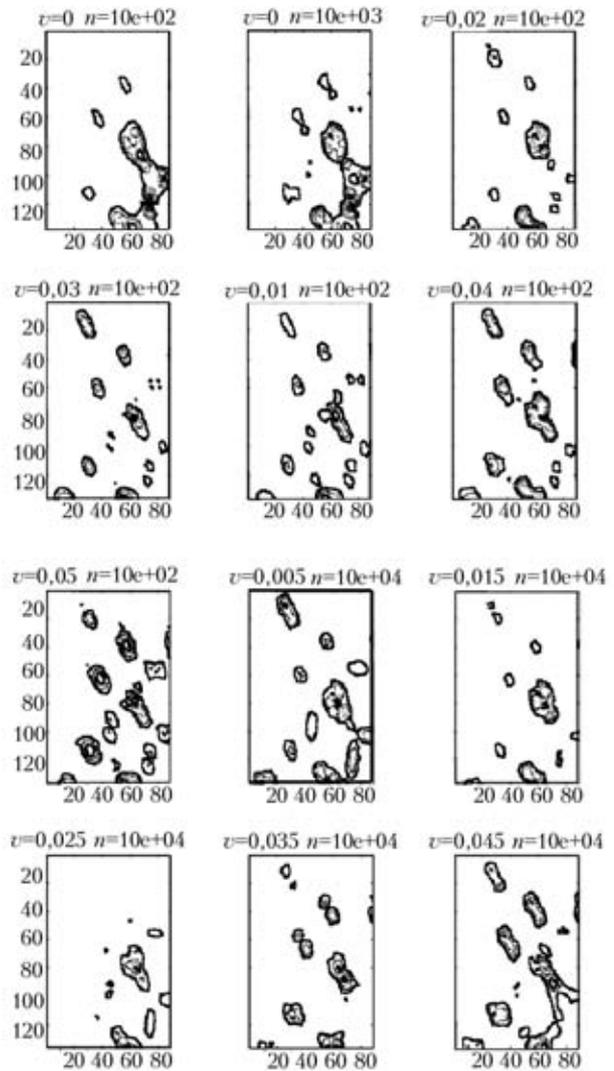


Рис. 4. Тестовое множество палитровых образцов

ментами которых являются числа от 0 до 255, после чего матрицы по столбцам преобразованы в вектор, который и подается на вход нейронной сети. Для решения задачи распознавания использовано по 20 обучающих и тестовых образцов. На рис. 3 приведены примеры элементов обучающего множества образов, а на рис. 4 — примеры элементов тестового множества.

Классификация состояния элементов рабочего колеса проведена с использованием ранее исследованной авторами на двумерных и трехмерных векторах диагностических признаков двухслойной стохастической нейронной сети [4], которая отличается малым временем обучения, возможностью обучения с нулевой ошибкой и высокой точностью

Зависимости относительных значений диагностических признаков от параметра трещины

ϑ	0	0,01	0,03	0,05	0,07	0,1
I_g/I_g^*	1	0,93	0,91	0,95	1,03	1,2
I_l/I_l^*	1	0,89	0,88	0,91	0,89	0,9
I_g/I_l	1,21	1,26	1,24	1,26	1,38	1,58

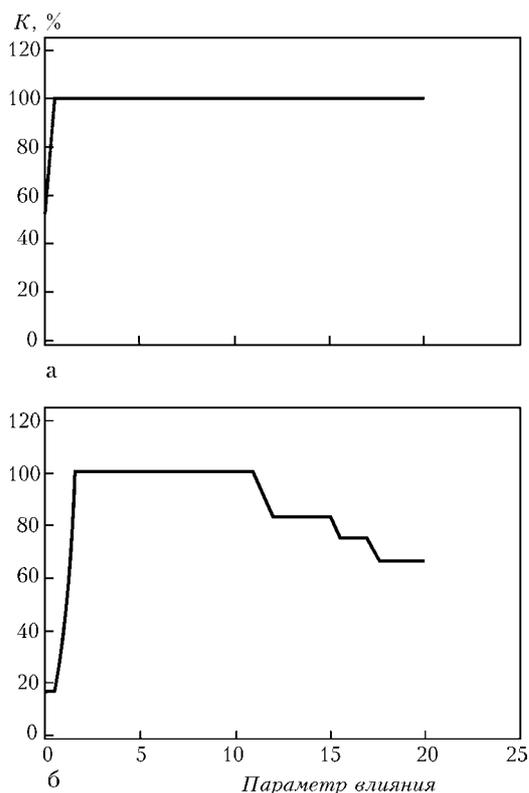


Рис. 5. Зависимость коэффициента эффективности от параметра влияния: а — для обучающего множества образов; б — для тестового множества образов

распознавания линейно неразделимых на имеющемся множестве диагностических признаков классов состояний объекта диагностики. Первый слой (скрытый радиально-базисный) содержит 20 нейронов. В качестве второго слоя, содержащего два нейрона, используется так называемый конкурирующий слой, который подсчитывает вероятность принадлежности входного вектора к тому или иному классу и в соответствии с полученным значением относит вектор к тому классу, вероятность принадлежности к которому больше по значению. Для такой классификации, основанной на использовании методов Байеса [9, 10], необходима оценка плотности вероятности для каждого класса, для чего используется множество обучающих векторов. При этом каждый из них описывается функцией Гаусса с центром в соответствующей данному вектору точке, а сумма указанных функций по всему множеству обучающих векторов представляет собой плотность вероятности входных векторов для каждого из классов. Значение среднего квадратического отклонения σ функции Гаусса задает ширину функции активации нейронов и определяет их влияние на оценку суммарной плотности вероятности. Из этого следует, что параметр σ влияет на результат классификации, поэтому его значение чаще всего выбирается экспериментальным путем.

Эффективность классификации состояния рабочего колеса стохастической нейронной сетью оценивалась по коэффициенту эффективности K , который представляет собой выраженное в процентах значение вероятности правильной классификации. Зависимости коэффициента K от параметра влия-

ния σ нейронной сети на обучающем и тестовом множествах образов приведены на рис. 5. Как видно из приведенных графиков, в диапазоне значений параметра $\sigma = 1,5, \dots, 11$ стохастическая нейронная сеть правильно распознает как обучающие, так и тестовые образы. Проведенный анализ зависимости коэффициента K от количества объектов обучающего множества образов показал, что для правильной классификации достаточно иметь обучающее множество из не менее восьми образов каждого класса.

Таким образом, несмотря на нерегулярность и незначительность изменений диагностических признаков при переходе от бездефектного состояния элементов рабочего колеса к состоянию зарождения и начального развития усталостной трещины в одной из лопаток, стохастическая нейронная сеть обеспечивает правильную классификацию состояния объекта диагностики.

Выводы

1. Проведено моделирование и многомерный спектральный анализ виброакустических процессов рабочего колеса авиационного двигателя на стационарном режиме при отсутствии и наличии малой усталостной трещины в лопатке. Показано, что зарождение и начальное развитие усталостной трещины приводит к изменению интенсивности глобальных и локальных экстремумов модуля биспектра. Оценено влияние аддитивных стационарных шумов на результаты многомерного спектрального анализа.

2. Показано, что использование стохастической нейронной сети позволяет провести правильную классификацию состояния объекта диагностики по результатам биспектрального анализа при значениях параметра трещины $\vartheta = 0,005, \dots, 0,1$. Определены минимальное количество объектов обучающего множества образов и диапазон изменения параметра влияния стохастической сети для обеспечения правильной классификации.

3. Полученные результаты являются новыми, подтверждают эффективность распознавания состояния объекта виброакустической диагностики по результатам многомерного спектрального анализа и возможность их использования при построении системы виброакустического мониторинга роторных элементов авиационных газотурбинных двигателей.

1. Бурау Н. И. О новых направлениях в развитии виброакустических методов диагностики прочностных дефектов в лопатках газотурбинных двигателей // Вибрации в технике и технологиях. — 2001. — № 4(20). — С. 45–48.
2. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов / Ф. Я. Балицкий, М. А. Иванова, А. Г. Соколова, Е. И. Хомяков. — М.: Наука, 1984. — 119 с.
3. Collis W. B., White P. R., Hammond J. K. Higher Order Spectra: the Bispectrum and Trispectrum, Mechanical Systems and Signal Processing. — 1998. — № 12(3). — P. 375–394.
4. Бурау Н. И., Зажичкий А. В., Тяпченко А. Н. Классификация состояния объекта виброакустической диагностики с использованием нейротехнических структур // Авіаційно-космічна техніка і технологія. — 2002. — Вип. 31. — С. 181–185.
5. Особенности использования FU-GE-NE-SYS алгоритмов в процессе синтеза нейронной модели состояния авиацион-



- ного двигателя / А. Г. Кучер, С. А. Дмитриев, Л. А. Журавлева, В. В. Камышин // Там же. — 2000. — Вып. 19. — С. 343–346.
6. *Интеллектуальный* контроль состояния авиационных ГТД / Г. Г. Куликов, П. С. Котенко, В. С. Фатиков, В. Ю. Арьков, Г. И. Погорелов // Там же. — 2002. — Вып. 31. — С. 163–167.
7. *Бендат Дж., Пирсол А.* Применения корреляционного и спектрального анализа / Пер. с англ. — М.: Мир, 1983. — 312 с.
8. *Brillinger D.* An Introduction to Polyspectra // Ann. Math. Stat. — 1965. — Vol. 36. — P. 1351–1374.
9. *Бурау Н. И.* Динамическая модель газотурбинного двигателя как объекта виброакустической диагностики усталостных трещин в лопатках рабочих колес // Вибрации в технике и технологиях. — 2001. — № 1(17). — С. 28–32.
10. *Биргер И. А.* Техническая диагностика. — М.: Машиностроение, 1978. — 240 с.
11. *Каллан Р.* Основные концепции нейронных сетей / Пер. с англ. — М.: Изд. дом «Вильямс», 2001. — 287 с.

Киев. нац. техн. ун-т Украины «КПИ»

Поступила в редакцию
28.01.2004



Фирма «ШЕРЛ»

Официальный дилер OLYMPUS, SONY

Фирма «ШЕРЛ» создана и зарегистрирована в 1993 г. Основными направлениями деятельности фирмы является поставка профессионального телевизионного и радиооборудования, медицинского оборудования, систем видеонаблюдения, систем видеоконференции, эндоскопического оборудования фирмы OLYMPUS для неразрушающего контроля.

Olympus производит все классы и типы авиационного эндоскопического оборудования: жесткие эндоскопы (бороскопы), гибкие эндоскопы (фиброскопы и видеоскопы), системы для документирования результатов осмотра — цифровые фотокамеры и видеосистемы. Длины рабочих частей эндоскопов Olympus для осмотра трубопроводов достигают 40 м, что делает возможным осмотр длинных трубопроводов — например, паропроводов острого пара, труб котлов, конденсаторов, трубопроводной обвязки реакторов и колонн, автономных энергетических установок.

Фирма Olympus производит самый широкий в мире размерный ряд технических эндоскопов и систем, предназначенных для эндоскопического контроля в промышленности. Минимальный размер обнаруживаемых с помощью эндоскопов Olympus поверхностных дефектов и повреждений составляет от 0,02 мм, возможны измерения объектов (дефектов) от 0,15 мм через эндоскоп (система IPLEX). Все эндоскопы могут быть укомплектованы накопителями цифровых изображений, или телекамерой ПЗС, или цифровой фотоаппаратурой для документирования результатов осмотра и результатов измерений дефектов. Новый видеоскоп Olympus IPLEX позволяет записать снимок дефекта в виде цифровой фотографии или видеофрагмента на карточку флэш-памяти (до 6000 снимков или 16 мин. видео) и затем перенести фотографии на персональный компьютер — в базу данных программы Olympus IPLEX Manager. С помощью п/о IPLEX Manager на записанных фотографиях можно осуществлять многократные замеры найденных повреждений и создавать иллюстрированные отчеты о проведенном контроле.

Изделия фирмы Olympus представляют собой наиболее совершенные приборы в своем классе и позволяют решать задачи визуальной диагностики промышленных объектов с неизменно высоким качеством.

ООО «ШЕРЛ»

01004, г. Киев, ул. Пушкинская, 43Б, оф. 4;

Тел.: 044 228-17-60, 235-19-85, 244-40-08

E-mail: vasilchenko.sherl@sherl.kiev.ua



РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ПЕЧНЫХ ЗМЕЕВИКОВ УСТАНОВОК КАТАЛИТИЧЕСКОГО РИФОРМИНГА И ГИДРООЧИСТКИ НЕФТЕПРОДУКТОВ

М. Д. РАБКИНА

Приведены данные по систематическому исследованию изменений физико-механических характеристик металла печных змеевиков установок каталитического риформинга и гидроочистки в течение длительного срока эксплуатации в водородосодержащих средах. Рассмотрены причины ускоренного разрушения печного змеевика, связанные с дефектами сварного шва и структурной текстурой основного металла. Приведены результаты металлофизических исследований.

Data are given on systematic investigation of variations of physico-mechanical characteristics of furnace coils metal in catalytic reforming and hydrorefining installations during long-term service in hydrogen-containing media. Causes are considered for accelerated fracture of furnace coil, associated with weld defects and structural texture of the base metal. Data of metallophysical investigations are given.

Часть 1. Исследование структуры и механических свойств металла печных змеевиков

Разнообразие агрессивных сред и рабочих условий, присущее процессам переработки нефти, способствует появлению в стенках металлической конструкции характерных эксплуатационных повреждений — коррозионно-эрозионных, водородно-слоистых, межкристаллитной коррозии и др. [1–5]. Это обуславливает необходимость периодического технического диагностирования оборудования после отработки им проектного срока службы.

Цель данного раздела работы состоит в изучении физико-механических изменений в металле печных змеевиков при длительной эксплуатации в водородосодержащих средах для выяснения возможности продления их дальнейшей работы, либо отбраковки.

Для проведения исследования были отобраны пробы металла (табл. 1) из радиантных камер печей установок гидроочистки и каталитического риформинга.

Таблица 1. Основные характеристики змеевиков камер радиации и технологические параметры работы печей

Проба	Блок	Марка стали	Диаметр трубы×толщина стенки, мм	Фактическая температура, град		Фактическое давление, МПа	Ориентировочный состав перерабатываемого сырья	Ориентировочное время наработки, ч							
				Вход	Выход										
1	Риформинг	15X5M-V	219×17	460	520	5,0	Бензин + ВСГ; Остальные составляющие, %: непредельные ≈ 0,5; нефтенные ≈ 10,0; ароматические ≈ 4; парафиновые ≈ 50	180000							
2		15X5M	219×9	300	290...400	2,7	Бензин	143000							
3			108×8	440	530										
4		аналог 1X2M1	76×7			156000									
5							181000								
6	Гидроочистка	15X5M	159×8,8	290	420	4,5...4,7	Бензин; Остальные составляющие, %: нафтанные ≈ 30; ароматические ≈ 30; содержание серы до 0,2; парафиновые	137000							
7															
8									168×10	330	425	4,9...4,7	Дизельное топливо + ВСГ	166000	
9									08X18H10T	219×10	305	400	6,25	Дизельное топливо + сероводород	150000
10															



Таблица 2. Химический состав металла проб печных змеевиков, мас. доля %

Проба	Год	C	Si	Mn	Cr	Mo
1	1995	0,11	0,36	0,45	4,4	0,49
Паспортные данные		0,11	0,39	0,40	—	0,53
2	2000	0,05	0,29	0,26	4,8	0,50
Паспортные данные		0,14	0,19	0,39	5,7	0,52
3	1994	0,11	0,33	0,44	5,0	0,56
6	1994	0,31	0,38	0,34	4,6	0,46
7	1994	0,12	0,33	0,30	4,3	0,39
8	1995	0,08	0,42	0,42	5,5	0,58
15X5M ГОСТ 20072-74	—	<0,15	<0,5	<0,5	4,5...6,0	0,45...0,60
4	1994	0,10	0,23	0,37	2,38	0,94
5	2001	0,16	0,27	0,41	2,36	0,90
Паспортные данные	—	0,08...0,15	0,15...0,40	0,30...0,60	2,0...2,5	0,9...1,1
1X2M1 ТУ 14-3-517	—	0,08...0,13	0,17...0,39	0,3...0,6	2,0...2,5	0,9...1,1
9	2000	0,08	0,7	1,10	17,5	—
10	2000	0,08	0,6	1,38	17,5	—
08X18H10T ГОСТ 5632-72	—	<0,12	<0,8	<2,0	17,0...19,9	—

Продолжение табл. 2.

Проба	Год	V	Ni	Cu	Ti	Al	S	P
1	1995	<0,02	0,08	—	—	0,028	0,013	—
Паспортные данные		—	—	—	—	—	0,007	0,027
2	2000	—	0,10	—	—	—	—	—
Паспортные данные		—	0,22	—	—	—	—	—
3	1994	—	0,20	—	—	—	—	—
6	1994	<0,02	0,32	0,13	<0,02	—	0,023	0,024
7	1994	<0,02	0,25	0,09	<0,02	—	0,027	0,018
8	1995	—	0,07	—	—	—	—	—
15X5M ГОСТ 20072-74	—	—	<0,6	—	—	—	<0,025	<0,030
4	1994	—	0,07	—	—	—	—	—
5	2001	—	0,10	0,07	0,001	0,015	0,022	0,017
Паспортные данные	—	—	—	—	—	—	<0,040	<0,035
1X2M1 ТУ 14-3-517	—	—	<0,5	<0,3	—	—	<0,035	<0,035
9	2000	—	10,8	—	0,55	—	—	—
10	2000	—	10,8	—	0,60	—	—	—
08X18H10T ГОСТ 5632-72	—	—	9,0...11,0	—	5•C...0,7	—	<0,020	<0,035

Следует отметить, что принципиальные технологические схемы этих установок на нефтеперерабатывающих заводах бывшего СССР практически идентичны [2]. Они, по существу, состоят из трех блоков: предварительной гидроочистки сырья, прежде всего, от сероводорода; собственно риформинга; стабилизации катализата и фракционирования. При этом конструкции печей могут иметь различные решения, включающие количество камер и их назначение.

Определение химического состава металла проб печных змеевиков имеет существенное значение, поскольку даже незначительные колебания в содержании элементов могут оказать влияние на формирование структурных и фазовых составляющих, что в последствии может отразиться, в первую очередь, на коррозионной стойкости труб, а также ряде других служебных свойств.

Из сопоставления результатов химического анализа, проведенного в настоящее время и нормированных значений (табл. 2), следует, что металл проб 1–3 и 6–8 соответствует составу среднехромистой стали марки 15X5M, 4 и 5 — низкохромистой (аналогу марки 1X2M1), 9 и 10 — коррозионно-стойкой стали марки 08X18H10T.

Прежде всего следует отметить, что в целом после длительных сроков эксплуатации химический состав металла печных змеевиков установок риформинга и гидроочистки не выходит за нормируемые значения. Однако, как можно видеть (см. табл. 2), в пробе 2 намечается тенденция к потере общего количества углерода и марганца, а в металле труб гидроочистки (пробы 6 и 7) и при более длительной эксплуатации (проба 5) — насыщение углеродом. При использовании стали марки 15X5M-У (проба 1), а также низкохромистой стали и сроках эксплуатации, не превышающих 156 000 ч (проба 4), в металле труб радиантных камер общее содержание углерода практически остается на постоянном уровне. Тем не менее, независимо от общего количества углерода в металле в нем возможны локальные изменения, связанные с на-

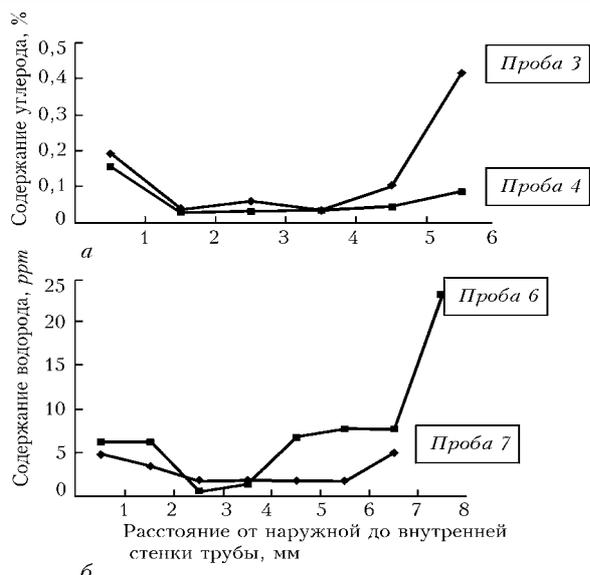


Рис. 1. Распределение углерода (а) и водорода (б) в стенках печных змеевиков

сыщением, либо обезуглероживанием различных сечений. Так, в металле пробы 2 со стороны внутренней поверхности трубы после длительной наработки (~143 000 ч), несмотря на общее снижение содержания углерода (табл. 2) был обнаружен не типичный для этих условий карбид Cr_3C_2 [5], что, скорее всего, связано с локальным увеличением концентрации углерода. Это предположение находит подтверждение при исследовании послойного распределения примесей внедрения. Видно, что в приповерхностных слоях, в особенности с внутренней стороны стенки имеет место насыщение как водородом, так и углеродом (рис. 1).

Таким образом, анализ химического состава отобранных проб позволяет заключить, что в металле печных змеевиков, проработавших определенный ресурс, в целом аномальных отклонений от марочного состава стали не наблюдается. Однако, в приповерхностных слоях стенок труб происходят локальные изменения, в первую очередь, по примесям внедрения, что в последствии приводит к структурным и фазовым преобразованиям.

Металлографический анализ металла печных змеевиков прежде всего включает оценку различного рода микронеоднородностей в виде вытянутых ферритно-перлитных полос, деформированных в направлении прокатки неметаллических включений, микронесплошностей, обезуглероженных либо науглероженных слоев, а также других микродефектов, особенно в приповерхностных сечениях стенок труб. Своевременное выявление несовершенств на микроуровне может предотвратить их дальнейшее развитие в макромасштабах. В табл. 3 представлены некоторые металлографические характеристики исследуемых проб. Видно, что среднехромистая сталь (пробы 2 и 3) после наработки печными змеевиками риформинга порядка 143000...156000 ч сохраняет структуру ФПС с баллом зерна феррита № 7. Обезуглероженных либо науглероженных слоев не обнаружено. Однако в приповерхностных сечениях наблюдаются отдельные структурные изменения. Так, для неоднородной структуры со стороны внутренней поверхности пробы 3 характерно увеличение микротвердости в полосах повышенной травимости ($HV 0,01-168$) по сравнению с обычной структурой ($HV 0,01-138$). Микроструктура металла змеевиков риформинга из улучшенной среднехромистой (проба 1)

Таблица 3. Металлографические характеристики печных змеевиков

Проба	Фазовый состав	Балл зерна по ГОСТ 5639-82	Микротвердость, $HV 0,01$	Состояние приповерхностных слоев
2	Ферритно-перлитная смесь (ФСП)	—	Средние значения — 136...143; с внутренней поверхности — 147; с наружной — 151	Травимость в 20 % водном растворе хромового ангидрида усиливается с обеих поверхностей
3		С внутренней поверхности — 7; в середине толщины — мелкодисперсная	С внутренней поверхности: в светлых полосах — 138; в темных полосах — 168	То же. Кроме того, со стороны внутренней поверхности полосы из светлых и темных зерен
4	Ферритно-карбидная смесь (ФКС)	С внутренней поверхности — 8, на середине толщины — 8...9	Средние значения — 148; с внутренней поверхности — 151...161	Корка коррозионных отложений с наружной поверхности
1		Везде 11...12, однородная	Средние значения — 143...145; с внутренней поверхности — 151...155; с наружной — 175	Травимость усиливается с обеих поверхностей, особенно с наружной. Кроме того, корка коррозионных отложений толщиной 0,3 мм с внутренней поверхности; 0,7 мм — у наружной
6		С обеих поверхностей — 8, в центре — 7	Средние значения — 147...166; с внутренней поверхности — 175...200; с наружной — 132...167	С внутренней поверхности — вытянутые несплошности на глубине 150...200 мкм — в большей степени выражены в пробе 6; с наружной — коррозионные отложения.
7			Средние значения — 150...157; с внутренней поверхности — 175; с наружной — 132...146	

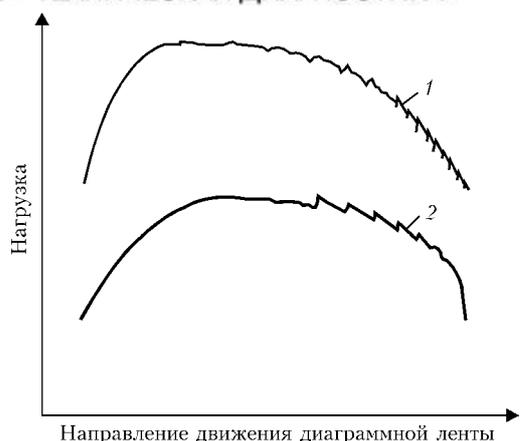


Рис. 2. Фрагменты диаграмм растяжения на стадии упруго-пластического деформирования образцов при разных температурах испытания: 1 — 400 °С (сталь 15X5M); 2 — 550 °С (сталь 08X18H10T)

и низкохромистой стали (пробы 4 и 5) практически однородна по толщине стенок труб и представляет собой ФКС. Однако, как и в предыдущем случае, травимость в водном растворе хромового ангидрида усиливается со сторон обеих поверхностей и распределение твердости носит подобный характер.

Что касается структуры металла коррозионно-стойкой стали, то в обеих пробах (9 и 10) она представлена зернами аустенита с двойниками, присущими фазе с кристаллической решеткой ГЦК. Однако, в металле пробы 10 она несколько мельче (балл зерна 7), чем в металле пробы 9 (балл зерна 6). Возможно, это связано с большим содержанием неметаллических включений в металле пробы 10 как дополнительными центрами кристаллизации при получении слитка и — рекристаллизации в процессе формирования заготовок. Следует также отметить, что со стороны внутренней поверхности обеих проб сохранилась текстура проката. Кроме того, на обеих поверхностях микротвердость несколько ниже, чем в срединных сечениях ($HV\ 0,1-206$), особенно со стороны внутренней поверхности ($HV\ 0,1-176$).

Таким образом, металлографические исследования не выявили существенных изменений, свидетельствующих о деградации структурных параметров в процессе работы печных змеевиков. При этом на обеих поверхностях стенок труб из теплостойких сталей, как правило, усиливается травимость в водном растворе хромового ангидрида и увеличивается твердость, у коррозионно-стойких — напротив, твердость в этих сечениях уменьшается. Учитывая длительную эксплуатацию рассматриваемых труб в углеводородосодержащих средах, разброс в значениях твердости, по-видимому, может быть связан не только с наследственным распределением легирующих элементов в твердом растворе и наличием вторых фаз — карбидов, нитридов и т. п., но и с влиянием углерода и водорода [6].

Ввиду различных сроков эксплуатации, разнородного состава перерабатываемых смесей, толщин стенок труб, а также ряда нерегламентированных ситуаций, не представляется возможным однозначно определить условия, послужившие причиной не только отмеченной структурной не-

Таблица 4. Механические свойства металла отобранных проб при различных температурах испытания

Проба	Предел текучести σ_T , МПа	Временное сопротивление σ_B , МПа	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение ψ , %
20 °С				
1	342,6	506,6	35,2	79,0
15X5M-У ГОСТ 14249-89	400,0	600,0	—	—
2	285,9	469,0	39,3	78,2
3	439,2	585,5	27,2	69,0
6	239,0	472,0	27,2	68,0
15X5M ГОСТ 550-75	216,0	392,0	22,0	50,0
4	351,6	491,1	37,8	70,6
5	355,0	507,0	29,0	76,4
1X2M1 ТУ-14-3-517	265,0	441,0	20,0	—
9	426,6	625,3	53,5	74,1
10	411,3	632,6	47,9	73,2
10*	331,8	610,1	52,7	73,5
08X18H10T ГОСТ 550-75	—	>510,0	>40,0	—
300 °С				
2	200,1	353,8	31,2	80,6
15X5M-У ГОСТ 14249-89	180,0	318,0	—	—
10	187,4	405,6	37,6	71,5
08X18H10T ГОСТ 14249-89	150,0	417,0	—	—
400 °С				
1	185,4	362,2	30,6	68,2
15X5M-У ГОСТ 14249-89	255,0	472,0	—	—
2	201,3	374,7	28,4	81,6
3	326,4	449,6	12,4	70,0
15X5M ГОСТ 14249-89	158,0	310,0	—	—
9	337,6	414,3	26,0	66,8
9*	203,2	388,8	—	—
10	215,9	391,8	34,5	68,4
10*	300,3	422,4	24,6	67,7
08X18H10T ГОСТ 14249-89	129,0	402,0	—	—
600 °С				
2	137,05	214,6	52,8	92,8
3	217,3	265,2	26,6	82,5
4	136,8	207,1	28,0	83,0
9	174,0	330,6	30,6	71,5
9*	295,0	371,4	26,2	71,6
10	282,8	374,1	18,7	68,7
10*	177,4	326,2	32,8	70,1

* После наработки 124 тыс. ч.

однородности, но и более серьезного дефекта, такого как образование коррозионных повреждений (подробно будет рассмотрено далее). Так, необходимо отметить наличие подобных повреждений на обеих поверхностях (см. табл. 3), а в ряде случаев в большей степени коснувшихся наружной стенки трубного элемента.



Результаты кратковременных испытаний на растяжение при комнатной и повышенной температурах представлены в табл. 4. Поскольку диапазон температур перерабатываемых продуктов составляет +(290...550) °С, испытания на растяжение с учетом температурных запасов были проведены в диапазоне температур: +(300...600) °С в вакууме 0,1 Па со скоростью нагрева 20...25 °С/мин и стабилизирующей выдержке при заданных температурах — 10 мин, а при температуре +20 °С на открытом воздухе.

Прежде всего следует отметить, что все прочностные и пластические характеристики исследуемых проб, за исключением пробы 1, находятся выше уровня соответствующих нормированных значений (табл. 4, 210; 300; 400 °С). При этом завышенные значения прочностных характеристик пробы 3 соответствуют снижению характеристик пластичности (табл. 4, 600 °С), где наблюдается деформационное динамическое старение (см. рис. 2).

Что касается проб из коррозионно-стойкой стали (пробы 9 и 10), то сопоставление значений прочностных характеристик по результатам испытаний после наработки 124 000 и 150 000 ч (табл. 4), отражает скорее неоднородность механических свойств отдельных труб змеевика, нежели какие-либо процессы эксплуатационной деградации. Как видно, металл пробы 10 после наработки 150 000 ч имеет значительно более высокий предел текучести при комнатной температуре, чем металл этой пробы после 124 000 ч (табл. 4, 20 °С). Вместе с тем, при температурах испытания +400 и +600 °С наблюдается обратная картина (табл. 4, 400, 600 °С). Последнее обстоятельство необходимо учитывать при оценке допускаемых сроков дальнейшей эксплуатации.

Результаты испытаний на ползучесть и длительную прочность. В соответствии с нормативными требованиями наряду с кратковременными

Таблица 5. Пределы длительной прочности и допускаемые напряжения

Проба	Температура, град	Предел длительной прочности $\sigma_{50000ч}$, МПа	Допускаемые напряжения $[\sigma]$, МПа		
			Фактические	ИТН-93	ГОСТ 14249-89
1 15X5M-Y	485	120,0	80,0	77,5	116,0
	520,0	80,0	53,3	62,0	85,0
2 15X5M	475	135,0	90,0	80,0	87,5
5 аналог 1X2M1	530	78,0	52,0	—	—
	550	58,0	38,7	—	—
	560	52,3	34,9	—	—
10 08X18H10T	550	130,0	86,7	78,5	76,0
	600	100,0	66,7	57,0	57,0

механическими испытаниями в указанном выше температурном диапазоне выполнялись испытания на ползучесть с последующим определением характеристик длительной прочности при соответствующих расчетных и более высоких температурах с учетом температурного коэффициента запаса. Эти результаты в целом свидетельствуют об отсутствии негативных изменений пластических свойств металла после длительных сроков эксплуатации. Не исключение составляет проба 10, характеризующаяся отдельными выпадками. Что касается показателей длительной прочности (табл. 5), фактические допускаемые напряжения превосходят нормируемые для изучаемых марок сталей, за исключением 15X5M-Y. Различия в допускаемых напряжениях по ГОСТ 14249-89 и ИТН-93 в сочетании с полученными экспериментальными данными (табл. 5) отражают нестабильность свойств упрочненной стали.

Часть 2. Исследование эксплуатационных повреждений в стенках печных змеевиков

К характерным эксплуатационным дефектам печных змеевиков в нефтеперерабатывающем производстве, как отмечалось [1], прежде всего, относятся местные коррозионно-эрозионные повреждения внутренних поверхностей труб, связанные с неравномерным нагревом, в том числе, в местах образования «пробок» из компонентов нагреваемого продукта. Эти дефекты имеют, как правило, не систематический характер и, соответственно, плохо обнаруживаются при диагностике.

Цель данного раздела исследования: получение информации о возможных причинах подобных разрушений.

Обнаруженные местные коррозионно-эрозионные повреждения внутренней поверхности печного змеевика (табл. 1, проба 8) показали, что разрушение началось от трещиноподобного дефекта в зоне сварного соединения разнородных металлов и получило развитие в направлении потока рабочей среды, наследуя форму этого дефекта (рис. 3).

Следует подчеркнуть, что разрушение стенки, развивавшееся только со стороны ее внутренней

поверхности, охватило около половины длины окружности трубы, простираясь от сварного соединения (почти перпендикулярно ему, рис. 3, Г) на расстояние около 250 мм. Видно, что в пределах представленного для изучения фрагмента конструкции повреждение имеет относительно строгую форму с плавными переходами — по краям к неповрежденному металлу (рис. 3, Д) и постепенным уменьшением толщины оставшегося сечения по мере удаления от сварного шва. Последний внешне прокорродировал относительно слабо. На поверхности разрушения просматриваются следы сварочной ванны (рис. 3, Г). В качестве рабочей гипотезы было выдвинуто предположение, что такое разрушение может оказаться результатом расплавления при сварке; развития трещин, идущих по поверхности сплавления; принципиально различных скоростей коррозии основного и наплавленного металла; сочетания указанных повреждений.

Исследования макро- (рис. 4) и микроструктуры (рис. 5, 6, 9), а также данные микрорен-

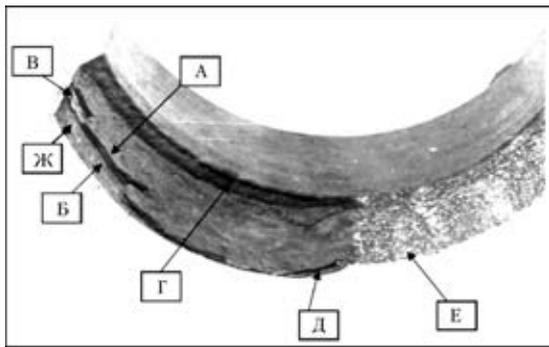


Рис. 3. Фрагмент разрушения

ттеноспектрального анализа (рис. 7) позволяют отметить следующие особенности:

- сварное соединение в поврежденной (рис. 4, а) и неповрежденной (рис. 4, б) его части выполнено многослойным швом, микроструктура которого характеризуется аустенитными зёрнами с дендритной субструктурой. Разрушение происходит по зоне сплавления со стороны шва, на котором сохранились остатки науглероженного слоя;

- науглероженный слой шириной, достигающей 150 мкм, расположен в металле шва на расстоянии 8... 15 мкм от границы сплавления, и проходит непрерывной грядой по всей высоте V-образной разделки (рис. 4); его твердость колеблется в пределах $HV\ 0,05\text{--}232...HV\ 0,05\text{--}254$ (рис. 5), причем большие значения соответствуют внутренней поверхности трубы, т. е. корню шва;

- обезуглероженный слой шириной 250... 300 мкм расположен со стороны основного металла от границы сплавления до области среднего зерна ЗТВ и проходит по всей высоте V-образной разделки; он обладает пониженной твердостью и имеет водородные полости (рис. 6, а);

- в металле шва между линией сплавления и науглероженным слоем имеется переходная «светлая» полоска шириной 10 мкм, где содержание никеля и хрома меняется скачкообразно (рис. 7); в самом шве их содержание стабилизируется.

Сопоставив полученные результаты с имеющимися, выделим две основные группы дефектов, способные вызвать образование рассматриваемого повреждения в зоне сплавления аустенитного металла шва с неаустенитной сталью: собственно сварочные и эксплуатационные.

К первой группе относятся дефекты шва — несплавление, «языки» основного металла в сварном шве, островки расплавленного металла в основном металле, водород в атмосфере дуги при ремонтно-сварочных работах, а также науглероженный и обезуглероженный слой; мартенитные участки, если таковые имеются.

Ко второй группе следует отнести дефекты, возникающие в результате проникновения сероводородных продуктов коррозии в дефекты зоны сплавления; дальнейшее ослабление обезуглероженного слоя в зоне сплавления за счет диффузии углерода при повышенных температурах из менее легированного в более легированный металл; длительный период работы в диапазоне температур 2-го вида хрупкости.

Необходимо отметить, что все перечисленные факторы тесно связаны между собой и при оценке работоспособности сварного соединения не отделяются один от другого. Так, при эксплуатации весьма чувствительными могут оказаться дефекты формы шва, первыми испытывающие поражения в условиях агрессивной среды. Например, *несплавление*, которое могло иметь место на всем протяжении участка корневой зоны (рис. 4, а); *за-*

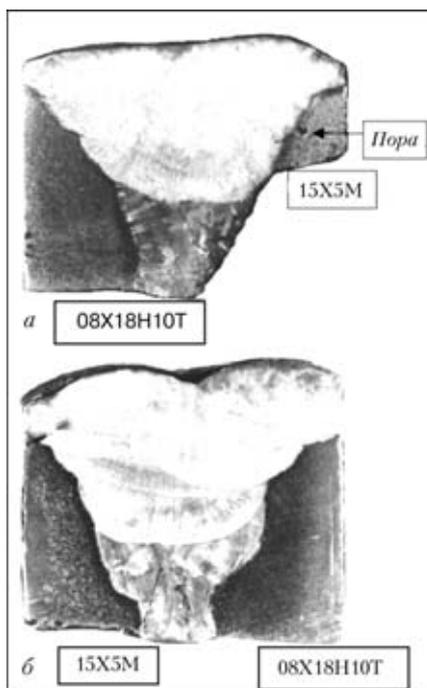


Рис. 4. Макроструктура сварного соединения разнородной пары сталей 15X5M и 08X18H10T в поврежденном (а) и неповрежденном (б) участках

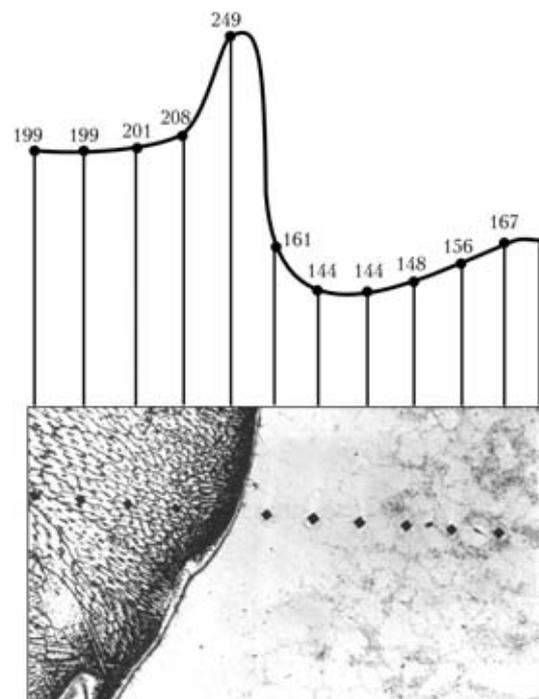


Рис. 5. Распределение твердости $HV\ 0,05$ в зоне сплавления со стороны стали 15X5M (X100)

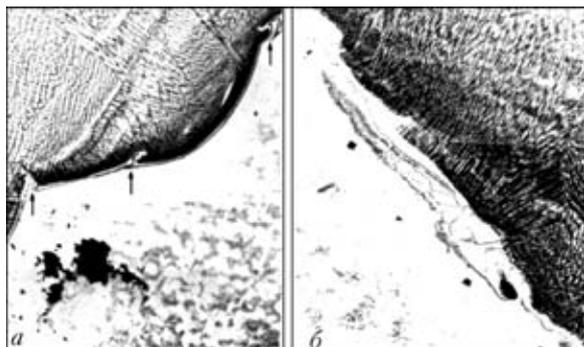


Рис. 6. Микроструктура зоны сплавления в неповрежденном участке сварного соединения со стороны стали 15Х5М: а — водородная полость у корня шва (стрелками показаны «языки» основного металла в наплавленном, Х50); б — затекание наплавленного металла по границам зерен основного металла, Х100

теkanie металла шва по границам основного металла и *вклинивание* «языков» основного металла в металл шва, которые можно видеть на сохранившейся части поврежденного участка и на неповрежденном участке (рис. 6). Следы коррозионных повреждений «языков» видны на боковой поверхности разрушенного соединения. Проявлению негативного влияния указанных факторов способствуют также сварочные напряжения и напряжения, вызванные различиями в коэффициентах линейного расширения разнородных металлов.

Следует подчеркнуть, что при сварке самозакаливающихся сталей образование ряда холодных трещин связывают не только со структурой закалки, имеющей низкие пластические свойства, но и с влиянием водорода, растворяющегося в жидком металле и затем поступающего в околошовную зону. Водород в процессе получения рассматриваемого соединения мог поступить в атмосферу дуги не только из электродов, а также из окружающей среды, в которой проводились ремонтно-сварочные работы.

Что касается процесса перераспределения углерода при сварке, то во время длительной эксплуатации при повышенных температурах он продолжается и, таким образом, обезуглероженная зона становится наименее коррозионно-стойкой. Остатки карбидной гряды, сохранившиеся на боковой поверхности разрушения, свидетельствуют о том, что разрушение сварного соединения наступило не сразу, а по мере раскрытия трещины и проникновения в нее перерабатываемых продуктов полость расширялась. Кроме того, со стороны обезуглероженного слоя также поступали продукты коррозии, размывая остатки низколегированного металла околошовной зоны. Начало этого процесса можно наблюдать со стороны корневой зоны в обезуглероженном слое неповрежденного участка (рис. 5, а).

Относительно мартенситных участков следует отметить, что хотя их образование в металле шва с высоким содержанием никеля мало вероятно, однако согласно диаграмме А. Шеффлера возможность такого превращения в данном случае все же существует. Со стороны металла шва в весьма узкой прослойке, до 15 мкм, где в результате разбавления наплавленного металла основным (особенно в области корневого шва) резко падает со-

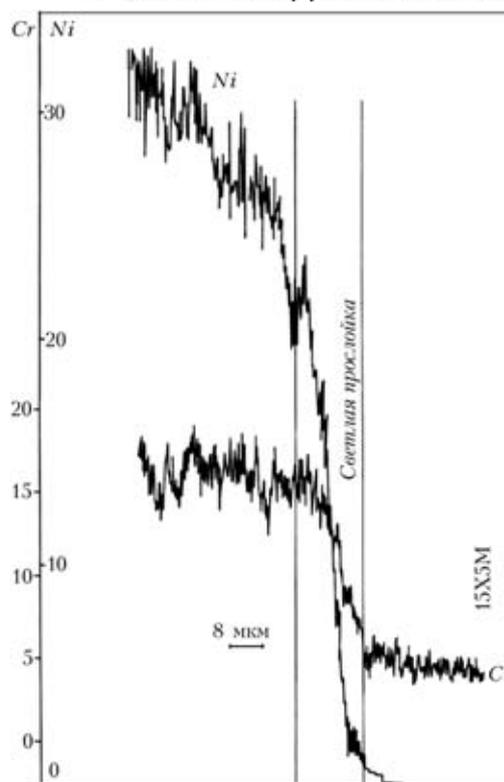


Рис. 7. Распределение никеля и хрома в зоне сплавления сохранившейся части поврежденного участка

держание никеля с 22 до 0,16 %, хрома с 16 до 5 % (рис. 7) мартенсит может появиться. Тот факт, что он не был обнаружен при исследовании сохранившейся части сварного соединения, а также рассматриваемого разрушения, не может полностью свидетельствовать об отсутствии этой фазы как таковой. Во-первых, в процессе коррозионного повреждения при эксплуатации возможно ее «разъедание», во-вторых, при водородном охрупчивании признаки влияния мартенситной структуры на характер поверхности излома, как известно, отсутствуют.

Таким образом, дефекты зоны сплавления, обусловленные сварочным процессом, развились в условиях эксплуатации в трещину, через которую беспрепятственно поступали продукты коррозии в глубь основного металла поврежденной трубы. Эти дефекты следует рассматривать как одну из основных причин местного ускорения коррозионно-эрозионных повреждений труб змеевиков. Следует подчеркнуть, что коррозионно-эрозионные процессы, развивающиеся со стороны неповрежденной поверхности трубы и со стороны ее «торца», образуемого тем или иным геометрическим дефектом поверхности, не эквивалентны. Различие предопределяется как разным развитием коррозионных процессов в связи с особенностями структурной текстуры, так и протеканием процессов эрозии.

Анализ коррозионно-эрозионных отложений. Как отмечалось, форма повреждения основного металла и толщина коррозионных отложений на разрушенном участке трубы наследует форму дефекта сварного шва. При удалении от сварного соединения в направлении потока эксплуатацион-

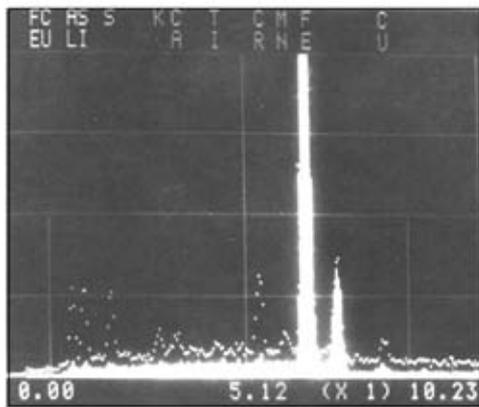


Рис. 8. Рентгеновский спектр отслоившейся корки с поврежденного участка

ной среды поперечное сечение границ повреждения несколько расширяется в первую очередь в направлении толщины стенки трубы и в меньшей степени — в виде отдельных коррозионно-эрозионных «язычков» — в направлении, перпендикулярном потоку среды. В области прокорродировавшей внутренней поверхности видны многослойные отложения толщиной порядка 1 мм.

В целом продукты коррозии со сторон обеих поверхностей труб можно разделить на *легко отделяющиеся* (отслаивающиеся); *трудно отделяющиеся*; *не отслаивающиеся от стенки трубы*.

Первый вариант относится к участку с аномальным утонением стенки трубы из теплостойкой стали 15X5M (рис. 3, между А и Б). К этому же варианту можно отнести отложения на наружной и внутренней поверхностях пробы 6. Второй имеет место на неповрежденном участке пробы 8 (рис. 9). Третий — на внутренней поверхности «катушки» из коррозионно-стойкой стали 08X18Н10Т.

Следует отметить, что три рассмотренных варианта имеют соответственно различную плотность, толщину и цвет. Например, в первом случае — это рыхлая толстая корка темно-бурого цвета, имеющая на внешней (рис. 3, А) и внутренней (рис. 3, Б) поверхностях кое-где белесые пятна. Под легко отделяющейся коркой поверхность стенки трубы также имеет повреждения.

Прежде всего, представляет интерес провести анализ *легко отделяющихся* продуктов коррозии. Внешняя (контактирующая с продуктом) поверхность корки (рис. 3, А) состоит в основном из окислов железа (рис. 8, сплошной спектр), что также подтверждается данными Оже-электронной спектроскопии (табл. 6). На внутренней, прилегающей к металлу трубы, поверхности корки (рис. 3, Б) сосредоточены хром, сера, кремний, алюминий, калий, кальций, титан, марганец, медь (рис. 8 — точечный спектр). Сера также преобладает на внутренних поверхностях труб неповрежденного участка проб 8 и 6. Разнообразные сернистые продукты являются результатом как прямого отложения серы, содержащейся в перерабатываемом сырье, так и результатом разложения сероводорода. Продукты, покрывающие наружную поверхность трубы, являются результатом сгорания топлива в факеле форсунки, включая от-

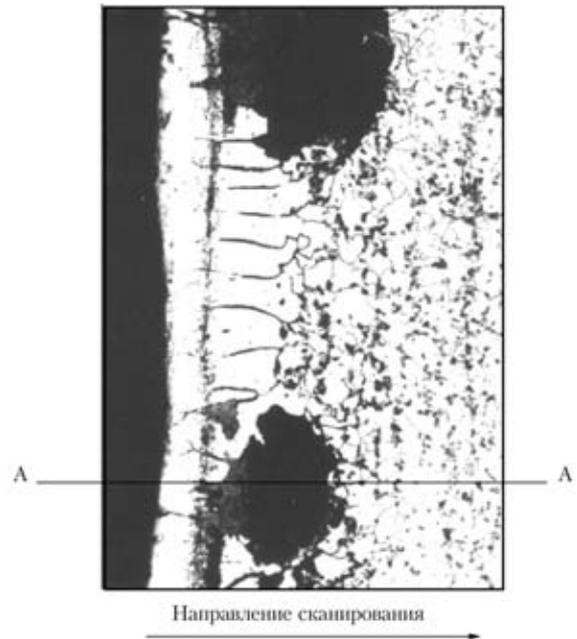


Рис. 9. Коррозионные полости и трудно отделяемые продукты коррозии со стороны внутренней поверхности трубы из стали 15X5M на неповрежденном участке (X100)

носителем высокое содержание ванадия. Так, при сгорании мазута в отложениях на наружной поверхности трубы образуются различные соединения типа ванадатов, комплексных сульфатов, щелочных металлов, способствующие повреждению защитного слоя и, соответственно, коррозии стали.

Таким образом, в составе подкорковых отложений, кроме существенного содержания серы, зафиксировано значительное количество хрома, свидетельствующее о трансформации твердого раствора.

Трудно отделяющиеся продукты коррозии. Под легко отделяющейся коркой коррозионных отложений, как отмечалось, также имеются поверхностные повреждения. Однако их состав несколько отличается от состава прокорродировавшей поверхности трубы вне зоны аномального разрушения. Как было показано, на внутренней поверхности стенки трубы с аномальным утонением содержание хрома повышенное, что также находит подтверждение и в других случаях. Следует отметить, что повышенное содержание хрома со стороны внутренней поверхности трубы по сравнению с наружной наблюдается также и в пробе 6. Как известно, легирование стали хромом, повышающее ее стойкость к коррозии, происходит, в первую очередь, за счет образования стойких поверхностных пленок. Наружный слой этих пленок содержит незначительное количество хрома, имеет рыхлое строение и, соответственно, относительно слабое сцепление с лежащим ниже слоем, особенно в случае его местных повреждений. Зато нижний слой прочно соединен с основным металлом и зачастую содержит более высокий процент хрома, чем основной металл, что подтверждают данные измерения твердости феррита в приповерхностных слоях ($HV 0,025-195$) по сравнению с твердостью феррита в срединных сечениях стенки трубы ($HV 0,025-110$).



Таблица 6. Распределение элементов (масс. дол. %) вдоль линии сканирования*

Элемент	Расстояние, мкм											
	0	50	100	150	200	230	250	280**	310	360	410	510
C	9,58	10,83	7,97	9,05	3,55	2,20	1,76	0,96	0,69	0,36	0,34	0,31
O	10,03	7,06	10,59	8,62	8,97	11,49	10,59	0,87	0,46	0,17	0,17	0,16
Al	0	0	0	0	0	0	0,08	0,34	0,06	0,06	0	0
S	12,50	10,34	8,60	11,58	11,93	10,64	3,86	0,32	0,05	0,13	0,02	0
Cr	11,38	10,37	12,22	12,45	10,03	10,51	7,64	5,01	5,06	4,21	4,40	4,84
Fe	56,48	61,26	60,54	58,22	65,45	65,04	75,99	92,44	93,64	95,03	95,01	94,65
Mo	0,10	0,15	0,09	0,07	0,12	0,07	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

Примечания. * См. рис. 9. ** Граница между «язвой» и основным металлом

При исследовании поврежденного участка со стороны внутренней поверхности трубы было обнаружено наличие своеобразной структуры, резко отличающейся от основной массы металла. Так, по глубине в направлении толщины стенки можно выделить, несколько слоев (рис. 9) различной твердости. Кроме того, имеют место единичные надрывы в виде коррозионных полостей «язв», между которыми расположены вытянутые зерна с резко очерченными границами. Аналогичные полости наблюдаются также со стороны внутренней поверхности пробы 6. Граница между «язвой» и не прородированным металлом (табл. 6) характеризуется, прежде всего, резким падением содержания кислорода, плавным снижением — углерода и серы, а также нормализацией состава по железу и хрому.

В целом, трудно отделимые продукты коррозии представляют собой чередующиеся структурные слои с неравномерным химическим составом.

Таким образом, интенсивное корродирование развивается послойно в связи с наличием ярко выраженной структурной текстуры и носит характер язвенной и целевой коррозии, преимущественно вдоль дефектов структурной текстуры. При проникновении водорода в металл со стороны поверхности трубы перпендикулярно строчечной текстуре на поверхности металла образуются стойкие защитные пленки, обогащенные хромом. При развитии коррозионных процессов параллельно строчечной текстуре и поверхности трубы четких следов их формирования не обнаружено, хотя рыхлые и легко отслаивающиеся продукты коррозии покрывают всю поверхность.

Для рассмотренного процесса разрушения характерно последовательное (послойное) расширение и углубление исходного дефекта со стороны основного металла, в основном в направлении потока среды и, соответственно, наследование его формы даже на значительном удалении от сварного соединения. Несплошность в свою очередь может углубляться за счет развития трещин по границе сплавления. Соответственно, при выполнении тех-

нической диагностики целесообразно, в первую очередь, обращать внимание на зоны, прилегающие к сварным соединениям, особенно ремонтным.

Таким образом, основной причиной местного ускоренного разрушения печного змеевика явилась активизация коррозионно-эрозийных процессов в результате возникновения в зоне сварного соединения дефекта типа несплавления. Его наличие предопределило возможность не только поверхностно-послойного повреждения металла, но и развития разрушения со стороны дефекта, последовательно охватывающего лежащие ниже слои материала и распространяющегося значительно более интенсивно в направлении потока среды вдоль структурной текстуры металла.

Интенсивное корродирование в виде язвенной и целевой коррозии развивается послойно в связи с наличием ярко выраженной структурной текстуры, что указывает на существенную роль коррозионной анизотропии металла.

1. *Некоторые* результаты технической диагностики сосудов и трубопроводов в нефтехимической промышленности // В. С. Гиренко, М. Д. Рабкина, В. П. Дядин, А. В. Бернацкий, Е. А. Давыдов, В. В. Кузьмин // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1998. — № 3. — С. 17–24.
2. *Коррозионная* стойкость оборудования химических производств // Ю. И. Арчаков, Б. М. Тесля, М. К. Старостина и др. // Сб. Нефтеперерабатывающая пром-ть. Справ. рук-во. — Л.: Химия, 1990. — 382 с.
3. *Серова Л. И., Шевку И. Г., Кристалл В. Г.* Влияние высокотемпературной эксплуатации на работоспособность печных змеевиков из аустенитных сталей типа X18H10T установок гидроочистки дизтоплива // Сб. Повышение эксплуатационной надежности нефтезаводского оборудования. — М.: — 1986. — С. 7–15.
4. *Ватник Л. Е., Марахова Г. К., Теплова Н. И.* Исследование структуры и свойств металла труб из стали 15X5M после длительной эксплуатации печных змеевиков камер конвекции установок каталитического риформинга // Там же. — С. 20–32.
5. *Рабкина М. Д., Маркашова Л. И.* О структурных превращениях в металле змеевиков печей каталитического риформирования углеводородов. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2002. — № 1. — С. 22–27.
6. *Белоголазов С. М.* Распределение в стали водорода, поглощенного при катодной обработке в кислоте и его влияние на микротвердость // Физика металлов и металлургия. — 1963. — 15, вып. 6. — С. 885–889.

ОБЩИЙ ОБЗОР МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛОВ

О. М. КАРПАШ, И. А. МОЛОДЕЦКИЙ, М. О. КАРПАШ

Рассмотрены состояние и перспективы развития современных методов оценки физико-механических характеристик металлов. Предложен новый комплексный подход для построения интеллектуальных систем оценки фактического технического состояния материалов и изделий.

The state of art and development perspectives of modern methods of evaluating of physical and mechanical characteristics of metals. New complex approach was proposed for development of intelligent systems for evaluation of actual technical condition of products and materials.

Известно, что физические и механические свойства материалов в значительной степени определяют работоспособность изготовленных из этих материалов объектов. Фактическое техническое состояние любого объекта с точки зрения его технического диагностирования определяется соответствием его физико-механических и геометрических характеристик их нормативным значениям и отсутствием дефектов типа нарушения сплошности материала. Последние два параметра можно оценить средствами и методами толщинометрии и дефектоскопии соответственно. А вот определение физико-механических характеристик (ФМХ) является не настолько легко решаемой задачей. И вдобавок, для большого количества бездефектных объектов именно ФМХ определяют их фактическое техническое состояние.

В свою очередь, вопрос оценки фактического технического состояния объектов разного назначения становится особенно актуальным в современных условиях, когда появилась острая необходимость продления срока эксплуатации объектов, отработавших свой нормативный ресурс. Все это усложняется неудовлетворительным финансовым положением подавляющего большинства предприятий, которые эксплуатируют большую часть металлоконструкций, выработавших свой нормативный ресурс.

В тоже время, улучшение экономического положения в Украине едва ли решит поставленную проблему — современные требования относительно энерго- и материалосбережения, а наоборот, заостряют ее. Существует также мировая тенденция, на основании которой при выводе объектов или их отдельных узлов (агрегатов) из эксплуатации учитывают не только нормативный срок эксплуатации, но и их фактическое техническое (физическое) состояние.

Рассмотрим два типа определения физико-механических параметров (ФМП):

1) непосредственные механические исследования, которые сопровождаются разрушениями образцов (или их частей);

2) косвенные методы определения физических и механических характеристик через измерение

других параметров (электрических, магнитных и т. д.), которые часто не сопровождаются разрушением объектов, и потому эти методы носят общее название неразрушающих.

Понятно, что для объектов, которые находятся в эксплуатации, применение первого типа методов недопустимо; тем более, что их реализация в эксплуатационных условиях может оказаться довольно затруднительной. Для таких задач необходимо использовать неразрушающие методы исследования материалов и изделий.

Нужно отметить, что в теории и практике неразрушающего контроля и технической диагностики сделан значительный шаг в направлении более точного и достоверного определения ФМП материалов, в частности, металлов. Концентрация исследовательских усилий на металлах объясняется прежде всего широким их использованием при изготовлении и сооружении разнообразнейших объектов.

В данной работе авторы пытаются обобщить и подытожить наиболее общие направления в теории и практике определения ФМХ металлов неразрушающими методами.

Объект исследований. Необходимо отметить, что ФМХ одного и того же металла могут существенно отличаться благодаря влиянию условий эксплуатации и других факторов: температурного режима в ходе эксплуатации, наличия или отсутствия агрессивных сред, наличия перегрузок, возможных дефектов типа нарушения сплошности (их размеры, расположение и тип) и т.д.

Для того, чтобы судить о методах определения ФМХ металлов, нужно коротко ознакомиться с перечнем тех величин, которые входят во множество исследуемых:

1) механические: модуль упругости; модуль сдвига; коэффициент Пуассона; предел прочности; предел текучести; прочность при разрыве и прочее;

2) физические: физическая плотность; анизотропия материала; кристалличность и размеры кристаллов; удельное электрическое сопротивление; диэлектрическая проницаемость; магнитная проницаемость и др.

Очевидно, что для оценки фактического технического состояния объектов (металлоконструк-



ций) наиболее важными являются прочностные характеристики и параметры структуры материала, поскольку они являются наиболее обобщенными и в достаточно полной мере дают возможность судить о фактическом физическом состоянии этих объектов.

Прочность — это способность материала оказывать сопротивление разрушению. Типичные кривые «напряжение — деформация» при исследованиях на разрыв имеют прямо пропорциональный характер только в зоне действия закона Гука, а дальше они имеют более сложный характер. Максимальное значение напряжения определяет величину так называемого временного сопротивления, которое принимают за меру прочности. На практике же для оценки максимального уровня рабочих нагрузок часто пользуются понятием предела текучести, который связан с пределом прочности.

Большое влияние на ФМХ металлов и сплавов имеет режим их термообработки при изготовлении. Например, твердость стали Ст30 по ГОСТ-5657–69 зависит от прокаливаемости (режима термообработки); эта зависимость подается в специальных полосах прокаливаемости [1].

Неразрушающие методы определения ФМХ.

В теории неразрушающего контроля (НК) и исследования материалов различают следующие основные методы определения ФМХ металлов: акустические, электромагнитные (вихретоковые), радиационные, магнитные, электрические.

Принцип действия любого из этих методов базируется на измерении той или иной величины (акустической, магнитной или электрической), связанной с нужными ФМХ через теоретически или экспериментально установленные зависимости.

Хотя в большинстве случаев эти зависимости носят сугубо эмпирический характер и были получены при соблюдении большого количества условий и допусков, они могут быть успешно применены только для решения конкретных задач и редко имеют серьезное теоретическое обоснование.

Примером этому может послужить контроль прочностных характеристик акустическим методом [2].

Акустические колебания в металлах имеют небольшую амплитуду, т. е. они соответствуют как раз начальному участку кривой «напряжение-деформация». Прогнозировать по параметрам акустических волн поведение кривой при больших напряжениях и деформациях аналитически невозможно [2], поэтому ищут корреляционные зависимости акустических параметров от прочности материала.

Наиболее информативными акустическими параметрами для оценки прочности материала считают скорость распространения волн [3] и степень затухания ультразвука в металлах.

Скорость распространения ультразвука аналитически связана с упругими константами, которые описывают начальный участок кривой «напряжение — деформация». Для ряда материалов и условий эксплуатации изделий из них измерение скорости УЗ колебаний вполне достаточно для оценки их прочности. Но, например, для ферромагнетиков существует тенденция к росту скорости рас-

пространения УЗ колебаний при росте магнитной индукции и этот рост может достигать 1 %.

В случае, если для определения ФМХ осуществляется измерение степени затухания ультразвука в металлах, то известно, что в металлах и сплавах затухание неоднозначно зависит от кристаллической структуры [4]. Уже на частотах в мегагерцовом диапазоне основная часть затухания ультразвука вызывается потерями энергии за счет рассеяния волны на отдельных кристаллах. При этом раздельное влияние первичного и вторичного зерна на распространение акустических волн пока недостаточно изучено и к тому же рассеяние сильно зависит от размеров зерна.

На примере акустического контроля ФМХ видим, как они сложно и часто не до конца понятно зависят от измеренных параметров. И это при том, что акустический контроль довольно хорошо теоретически проработан и реализован в большом количестве технических средств.

Рассмотри последние разработки отечественных ученых в направлении магнитного метода контроля усталостного состояния и ресурса металлопродукции, представленный в работе [4]. Описанный метод, как и сам подход к задаче, интересны, хотя и не являются абсолютно новыми (метод магнитной памяти металла [5]). Метод базируется на том, что в каждом типе конструкций есть характерные места усталостного преддефектного состояния материала и эти места могут быть выявлены с помощью измерения коэрцитивной силы вдоль объекта контроля.

Однако этот подход имеет ряд очевидных недостатков:

1) в нормативных документах на стали магнитные характеристики не нормируются (согласно ГОСТ на производство) — это объясняется и явлением остаточной и спонтанной намагниченности, гистерезисом, нелинейностью связей между ними, сложностью проведения измерений и т.д.;

2) характерные места пластической деформации — это только места наиболее вероятной локальной пластической деформации (и возможного разрушения как следствие), но они совсем не определяют в действительности места всех преддефектных участков и участков с существенным отклонением ФМХ;

3) коэрцитивная сила — магнитная характеристика материала, которая является анизотропной величиной и зависит от многих других характеристик: в [6] указывается на наличие зависимости коэрцитивной силы стали 65Г от температуры отпуска, которую косвенно можно определить по значениям твердости поверхностного слоя стали;

4) существует реальная возможность оценивать остаточный ресурс металлопродукции только определенного типа, изготовленной из конкретных марок сталей.

Радиационные методы в основном используются для структурного анализа (рентгеноструктурный анализ), а для определения ФМХ могут служить только в качестве вспомогательных.

Исследовательские приемы, основанные на применении электрических характеристик, огра-



ничены областью применения самого метода контроля. Хотя с их помощью можно измерять удельное электрическое сопротивление (проводимость), диэлектрическую проницаемость диэлектрических материалов, коэффициент диэлектрических потерь и на их основании можно оценивать состав материалов и их структуру. Но для металлов и сплавов использование этих методов, скорее всего, не является перспективным по крайней мере на данном этапе.

Существует также ряд технических средств для контроля ФМХ отдельных типов изделий (например, прибор типа СИГМА-Т10.1 для контроля труб нефтяного сортамента), принцип действия которых — вихретоковый. Они хорошо себя зарекомендовали при определении предела текучести, хотя он часто не является определяющим параметром при оценке фактического технического состояния того ли иного вида металлопродукции [7].

Возможные пути решения задачи. Проанализировав сказанное выше, можно утверждать, что состояние развития НК в мире не соответствует всевозрастающим проблемам при определении ФМХ металлопродукции. Наблюдается ситуация, когда повышается уровень технического оснащения, улучшается финансирование служб НК, повышается квалификация персонала, а общей или специальной методики определения ФМХ хотя бы для металлов нет. Исследования в этом направлении являются очень узкоспециализированными, а разрабатываемые устройства пригодны к использованию только при соблюдении многих условий и для определенных типов материалов и изделий.

Авторы видят два пути решения данной задачи, которые в дальнейшем могут объединиться в один:

1) комплексное измерение многих параметров разными методами при условии, что минимальное количество измерений даст максимум диагностической информации, которая будет использоваться при оценке работоспособности того ли иного объекта;

2) осуществление измерений дополнительных параметров согласно физическим законам, которые не принимались во внимание в НК до настоящего времени.

Реализация первого пути может быть осуществлена с помощью современных способов решения многопараметрических задач [8]. Здесь целесообразно было бы использовать подход на базе нейронных сетей. Использование нейросетей даст возможность получить зависимости между входным комплексом параметров и исходными параметрами (ФМХ). Также возможно осуществлять отбор наиболее информативных входных параметров.

Относительно дополнительных параметров можно сказать, что здесь ситуация более неопределенная. Приведем некоторые возможные направления.

1) Использование эмпирического закона Видемана–Франца (1853 г.), гласящего, что отношение теплопроводности к электропроводности для большинства металлов пропорционально температуре, причем коэффициент пропорциональности одинаков практически для всех металлов [9]. Очевидно, что аналогичная зависимость должна

существовать и для сплавов металлов (стали) и, скорее всего, ее можно использовать для определения тех или иных еще не известных ФМХ сталей.

2) Известно, что при низких температурах все тела (кроме гелия) становятся твердыми. Вместе с тем для того, чтобы тело было твердым, его температура должна быть меньшей, чем энергия взаимодействия атомов. Отсюда, если уровень энергии взаимодействия атомов под действием тех или иных факторов падает, то тело постепенно перестает быть твердым. Сама же энергия взаимодействия атомов имеет много составляющих, и одной из основных есть сила взаимодействия электронов (как свободных, так и связанных), дырок в металле. Оценить концентрацию электронов на поверхности можно с помощью эффекта Холла. Постоянная Холла указывает на концентрацию зарядов и на их знак (электроны это или дыры) [9].

3) Твердость довольно часто не учитывают при оценке фактического технического состояния, поскольку ее измерения справедливы только для поверхностного слоя металла. Но в этом и кроется «скрытый» плюс: твердость, как и глубина упроченного слоя металла, дает возможность довольно точно определить количественные и качественные показатели термообработки металла, которые в свою очередь в значительной мере определяют его ФМХ.

4) Представляет интерес использование закона Грюнайзена, который гласит, что отношение коэффициента температурного расширения к теплоемкости твердого тела не зависит от его температуры [9]. Т. е., очевидно, что при комплексной оценке многих параметров металлов нужно учесть влияние этих обоих параметров как независимых.

5) Если речь идет об измерении скорости распространения ультразвука, анализ изменений отношения скоростей продольной и поперечной волны: $C_1 > 1,1547C_t$ [10] может указывать на структурные изменения в материале — поперечные волны характерны только для твердых тел, и их изменение в меньшую сторону может свидетельствовать о разрушении кристаллической структуры металла.

Приведем некоторые практические результаты, которые могут послужить обоснованием для проведения комплексного контроля ФМХ по многим параметрам.

Авторами использовались справочные данные для ряда сталей иностранных марок (grades): 301, 440, 904L, 410, 630, 431, UR52N+, 420, 2205, 416, 409, 3CR12, 304, 310, 321, 347, 430, 430F, S30815.

Для данных марок сталей согласно системе нормативных документов серии ASTM нормируются такие величины: предел прочности, предел текучести, твердость, физическая плотность, коэффициенты теплового расширения в разных температурных диапазонах: от 0 до 100 °С, от 0 до 315 °С, от 0 до 538 °С, теплопроводность в диапазонах: от 0 до 100 °С и от 0 до 500 °С, удельная теплоемкость и электропроводность.



Указанные графические зависимости (рис. 1) имеют сложный характер, и предшествующая практика авторов работы с алгоритмами нейронных сетей [11] указывает на возможность контроля прочности стали по таким физическим характеристикам. Поэтому по числовым данным для указанных марок сталей были проведены исследования с помощью нейронных сетей для установления наличия корреляционной связи между прочностными параметрами (пределом текучести и пределом прочности) и остальными характеристиками сталей.

Учебное множество состояло из параметров всех имеющихся марок сталей, кроме двух (420 и 310), которые потом использовали в качестве тестовых. Нейронные сети должны были по определенным входным наборам параметров сталей определять значения предела прочности — задача аппроксимации функции.

В процессе исследований обнаружена стойкая корреляционная зависимость между пределом прочности и такими параметрами, как: твердость, коэффициент теплового расширения в диапазонах от 0 до 100 °С и от 0 до 315 °С, теплопроводность в диапазоне от 0 до 100 °С и, в меньшей мере, электропроводностью.

Результаты исследований. Целевые значения предела прочности — постоянные 420 и 310 — (655; 515) МПа.

1) Сеть: вход — твердость и коэффициент теплового расширения в диапазоне температур от 0 до 100 °С; выход — предел прочности.

Выход сети при подаче тестовых значений — (604,6; 515,5).

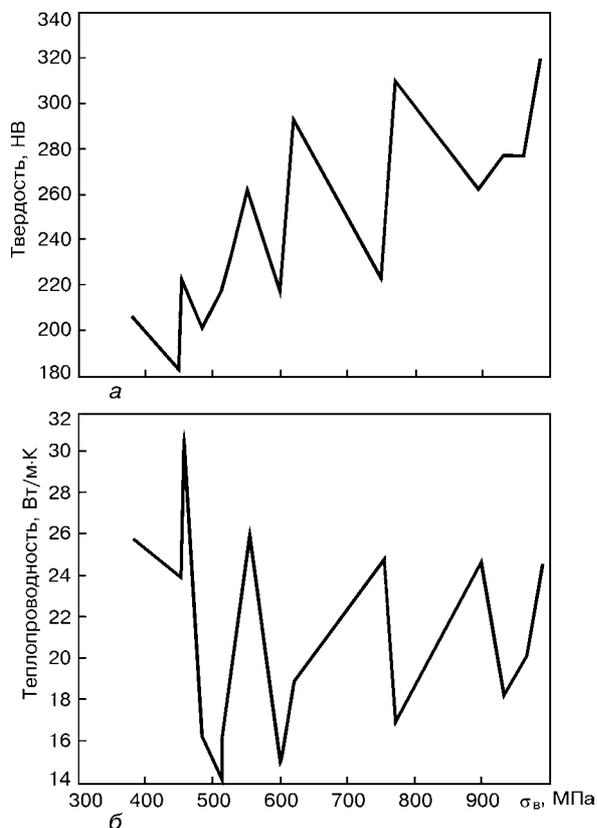


Рис. 1. Зависимость твердости (а) и теплопроводности (б) от значений предела прочности

2) Сеть: вход — твердость, коэффициенты теплового расширения в диапазонах температур от 0 до 100 °С и от 0 до 315 °С; выход — предел прочности.

Выход сети при подаче тестовых значений — (648,6; 516,4)

3) Сеть: вход — твердость, коэффициенты теплового расширения в диапазонах температур от 0 до 100 °С и от 0 до 315 °С, коэффициент теплопроводности; выход — предел прочности.

Выход сети при подаче тестовых значений — (632,9; 533,9).

4) Сеть: вход — твердость, коэффициенты теплового расширения в диапазонах температур от 0 до 100 °С и от 0 до 315 °С, коэффициент теплопроводности и электропроводность; выход — предел прочности.

Выход сети при подаче тестовых значений — (627,8; 547,9).

Средняя относительная погрешность определения предела прочности по всем результатам составляет 7,1 %.

В ходе работы с параметрами указанных выше марок сталей было отмечено две интересных тенденции.

Вначале (при проверке закона Грюнайзена) были получены отношения коэффициента температурного расширения к теплоемкости. При этом значения этого отношения в условных единицах разделились на два класса: значения в окрестности числа 0,03 и около 0,02. Затем, при вычислении отношения теплопроводности к электропроводности (закон Видемана–Франца) ситуация стала похожей, значения разделились на близкие к 0,022 и к 0,04. Причем, в обоих случаях марки сталей в любой из групп при проверке обоих законов: те стали, которые в первом случае имели отношения, более близкие к 0,03, во втором — более близкие к 0,022, и также с другой группой марок сталей.

Такая классификация марок сталей была довольно странной, и направление ее было тяжело объяснить. Но при более детальном анализе оказалось, что группа сталей, у которой первое отношение было близко к 0,022, а второе — к 0,03, — являются аустенитными сталями, а другая

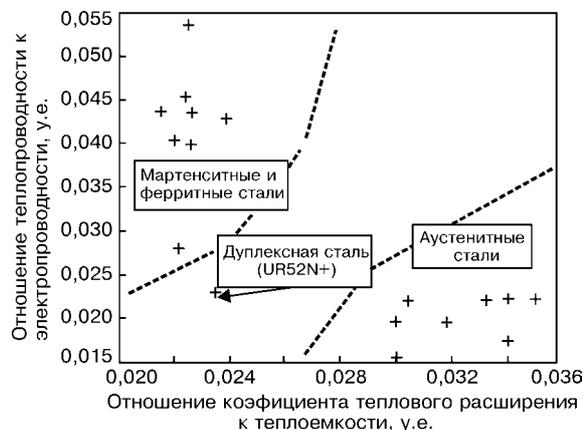


Рис. 2. Классификация сталей по трем классам на основании отношения коэффициента теплового расширения к теплоемкости и теплопроводности к электропроводности



группа состояла из мартенситных и ферритных сталей (рис. 2).

Отсюда очевидно, что классификацию сталей в первом приближении относительно их структуры можно оценивать по одному или обоим отношениям.

Тем более, благодаря тому, что измерения теплопроводности и электропроводности носят локальный характер, появляется возможность получения топографической картины структурных изменений на поверхности материала.

Выводы

Современное состояние в области неразрушающего определения ФМХ металлов и сплавов является неудовлетворительным и требует разработки универсальных подходов.

Предлагается осуществлять комплексное измерение параметров (удельной электропроводности, теплопроводности, твердости) НК и применение методов нейронных сетей для построения систем интеллектуальной оценки фактического технического состояния.

Дополнить теоретическую базу новыми принципами и законами из теории физики твердого тела: законом Видемана-Франца, Грюнайзена и т.д.

1. *Марочник* сталей и сплавов / Под общ. ред. В. Г. Сорокина и др. / М.: Машиностроение, 1989. — 640 с.
2. *Неразрушающий контроль* / В 5 кн. Кн. 2. Акустические методы контроля: Практ. пособие под ред. В. В. Сухорукова. — М.: Высш. шк., 1991. — 283 с.
3. *Бражников Н. И.* Ультразвуковые методы (физические и физико-химические методы контроля состава и свойств вещества) / Под общ. ред. Н.Н. Шумиловского. — М.-Л.: Энергия. — 1965. — 248 с.
4. *Безлюдько Г. Я.* Эксплуатационный контроль усталостного состояния и ресурса металлопродукции неразрушающим магнитным коэрцитиметрическим методом // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2003. — № 2. — С. 20–26.
5. *Дубов А. А.* Диагностика котельных труб с использованием магнитной памяти металла. — М.: Энергоатомиздат, 1995. — 420 с.
6. *Структура і фізичні властивості твердого тіла: Лабораторний практикум: Навч. посібник* / За ред. Л.С. Палатенка. — Київ: Вища шк., 1992. — 311 с.
7. *Крипичный П. Я., Молодецкий И. А.* Прилад для контролю фізико-механічних характеристик труб нафтогазового сортаменту СИГМА-5Т // Методи і прилади контролю якості. — 1998. — № 2. — С. 9–10.
8. *Уоссермен Ф.* Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика. — М.: Мир, 1992. — 348 с.
9. *Ашкрофт Н., Мермин Н.* Физика твердого тела / В 2 т. Том 1. — М.: Мир, 1979. — 420 с.
10. *Ландау Л. Д., Лифшиц Э. М.* Механика сплошных сред / В 10 т. Том 7. Теория упругости. — М.: Наука, 1986. — 248 с.
11. *Райтер П. М., Карнаш М. О.* Нейронні мережі для вимірювання багатозафазних потоків // Мат. конф. «Фізичні методи і засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. — ЛЕОТЕСТ-2003», Львов, 15–18 лютого 2003.

Науч.-произв. фирма «Зонд»,
Ивано-Франковск

Поступила в редакцию
15.09.2003

Встреча профессионалов

ДЕФЕКТО СКОПИЯ — 2004

V МЕЖДУНАРОДНАЯ
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ
ВЫСТАВКА ПРИБОРОВ И
ОБОРУДОВАНИЯ
ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОГО
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

14–16 СЕНТЯБРЯ

Санкт-Петербург,
Михайловский манеж,
Манежная пл. 2

Справки по участию ВО РЕСТЭК
Тел: (812) 320-8092, 235-0497 sci&ind@restec.ru www.restec.ru

Информация ЖУРНАЛ В МИРЕ НК
Тел: (812) 324 0668 expo@ndtworld.com www.ndtworld.com



НОРМИРОВАНИЕ ВИБРАЦИИ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ВИБРООБСЛЕДОВАНИЙ

Е. А. ИГУМЕНЦЕВ, Е. А. ПРОКОПЕНКО, Я. С. МАРЧУК

Разработана статистическая модель нормирования общего уровня вибрации газоперекачивающих агрегатов (ГПА). Предельные уровни вибрации, при которых ремонт агрегатов не требуется, установлены посредством критерия Неймана–Пирсона. Получена плотность распределения вероятности общего уровня случайной вибрации агрегатов, рассчитаны предельные уровни виброскорости корпусов подшипников ГПА-10. В качестве предельных значений использованы моменты первого и второго порядка полученного распределения.

A statistical model has been developed for norming the overall vibration level in gas pumping units. Limit vibration levels, which do not require repair of the units, were established using the Neyman-Pearson criterion. Probability distribution density of the total level of accidental vibration of the units has been derived, limit levels of vibration speed of GPA-10 bearing cases have been calculated. Moments of the first and second order of the obtained distribution have been used as limit values.

Одной из проблем при эксплуатации ГПА является правильная сравнительная оценка интенсивности вибрации, замеряемой на корпусах подшипников.

В зависимости от диагностической модели технического состояния ГПА может быть оценено методами статистических решений, которые требуют для описания технического состояния ГПА определения допустимого значения уровня вибрации V_n [1]. Статистический подход определения V_n предусматривает два пути. Первый основан на текущих показаниях вибрации машин, находящихся в хорошем состоянии, с определением V_n для вероятности, не превышающей заданный нижний уровень [2]. Использование этого метода ограничивается тем, что не учитывается влияние на V_n вероятности безотказной работы машины P_x в зависимости от проведенных ремонтов.

Второй путь основан на статистическом критерии (лемме) Неймана–Пирсона, согласно которому, зная лишь вероятностную плотность вибрационного сигнала $p_V(V)$, полученного при пассивном эксперименте на ГПА, находящихся в хорошем состоянии, минимизируется вероятность выхода из строя ГПА путем определения оптимального значения заранее заданного уровня A для величины V_n с учетом вероятности безотказной работы [3]. Однако, при определении предельного уровня вибрации V_n закон вероятности безотказной работы парка ГПА в работе [3] не установлен.

С целью повышения точности путем учета закона вероятности безотказной работы ГПА оптимальное значение заданного уровня A можно определить путем отбора критерия для простой гипотезы H : «Ремонт не нужен». С ней конкурирует альтернативная простая гипотеза H_1 : «Поломка не произойдет, если вовремя отремонтировать ГПА». Критическая область V_n проверяет простую гипотезу H на уровне значимости A . Согласно лемме Неймана–Пирсона для предельной величины можно записать:

$$\int_{V_n}^{\infty} p_V(V)dV / \int_{V_n}^{\infty} p_x(V)dV \leq A. \quad (1)$$

Здесь $P_x = \int_{V_n}^{\infty} p_x(V)dV$, $p_x(V)$ — вероятность и плотность вероятности безотказной работы ГПА (поломка не произойдет) в функции вибрации V ;

$P_V = \int_{V_n}^{\infty} p_V(V)dV$, $p_V(V)$ — вероятность и плотность вероятности вибрации ГПА.

Следует отметить, что вероятность безотказной работы ГПА P_x связана с вероятностью отказа P_o (рис. 1) равенством:

$$P_x = (1 - P_o) = 1 - \int_{-\infty}^{V_n} p_x(V)dV. \quad (2)$$

Прежде чем определить V_n из неравенства (1) получим V_n как случайную переменную величину для различных V по неравенству Чебышева аналогично [1] в следующем виде:

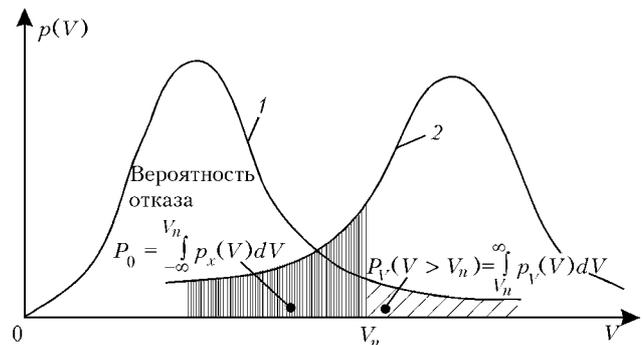


Рис. 1. Выбор гипотезы о ненужном ремонте на основе критерия Неймана–Пирсона; 1 — плотность вероятности вибрации ГПА $p_V(V)$; 2 — плотность вероятности отказа $P_x(V)$



$$P_V(V - \bar{V} \geq z\sigma_V) \leq \frac{1}{2t^2}, \quad V_n - \bar{V} = z\sigma_V > 0, \quad (3)$$

где $P_V(V - \bar{V} \geq z\sigma_V)$ — вероятность превышения V предельного значения $V_n = \bar{V} + z\sigma_V$; z — число, характеризующее порядок отклонения среднеквадратичных значений σ_V от среднего значения \bar{V} .

Учитывая, что знак равенства в (1) и (3) минимизирует отказ и оптимизирует V_n , объединяя (1) и (3) и вводя замену $A = KP_V$, получаем

$$K = \frac{1}{2P_x P_V z^2}, \quad (4)$$

где K — коэффициент запаса поломок, подтверждающий гипотезу о том, что ремонт не нужен [2] ($K = 1...3$ — обычные поломки, $K = 3...10$ — поломки с опасными последствиями); среднее и среднеквадратичное значения вибрации (виброскорости) парка агрегатов вычисляются по известным формулам математической статистики [1, 3].

Соотношение (4) позволяет по известному распределению плотности вероятности вибрации парка агрегатов $p_V(V)$ и плотности вероятности отказа $p_x(V)$ (см. рис. 1) с помощью таблицы квантилей подобрать z , P_x и P_V таким образом, чтобы гипотеза H принималась, а затем рассчитать по уравнению (1) предельное значение V_n .

В работе [3] получено «вибораспределение», т. е. плотность распределения виброскорости парка ГПА в следующем виде:

$$p_V(V) = \frac{\alpha^2 p(V)}{\alpha^2 - 1}, \quad p(V) = \frac{V}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{V^2}{2\sigma^2}\right), \quad \alpha = \sigma_r / \sigma_{ш}, \quad (5)$$

где $p(V)$ — распределение вероятности Рэлея; $\sigma^2 = \sigma_r / \sigma_{ш}$ — дисперсия виброскорости; $\sigma_{ш}$, σ_r — среднеквадратичные значения (СКЗ) шума и гармоники [1].

Экспериментальное определение отношения «сигнал–шум» α , входящего в соотношение (5), требует применения аппаратуры спектрального анализа. Однако, если воспользоваться теоретической зависимостью между амплитудой первой роторной гармоники виброскорости и общим уровнем вибрации [3], то для набора статистических данных по среднеквадратичному значению σ виброскорости парка ГПА можно использовать обычный виброметр.

Прежде чем приступить к вычислению вероятности отказа P_0 заметим, что ГПА состоит из многих элементов, каждый из которых имеет свою функцию распределения отказа. Установлена классификация причин отказов ГПА [4] по следующим группам: конструктивные дефекты; технологические дефекты; эксплуатационные дефекты; старение (износ) деталей и узлов. При этом имеют место следующие схемы возникновения отказов: мгновенные повреждения, накапливающиеся изменения, релаксации и действие нескольких независимых причин.

Алгоритм обработки экспериментальных данных одинаков как при исследовании лопаточного

аппарата турбоагрегата и надежности подшипников, так и при исследовании надежности всего ГПА. Используя математический аппарат теории надежности, на основании исходных статистических данных составим вариационный ряд случайной величины t_i . Получим эмпирическое распределение, характеристиками которого являются количество исследуемых ГПА (n), время безотказной работы (t_i), количество отказов ($m(t_i)$). Эмпирическое распределение приводим к виду, удобному для анализа. Для этого определим в каждом интервале частность $v(t_i) = m(t_i)/n$ [5], а затем построим гистограмму. По виду гистограммы и на основании ранее проведенных теоретических и экспериментальных исследований [4] распределением величины t_i служит логарифмически нормальное распределение или распределение Вейбулла–Гнеденко. Приближенную проверку гипотезы о нормальности эмпирического распределения проводим с помощью асимметрии и эксцесса, вычисляемыми по следующим формулам:

$$S = m_3 / \sigma_t^2, \quad E = m_4 / \sigma_t^4 - 3, \quad (6)$$

где $m_3 = \sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^3 / n$, $m_4 = \sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^4 / n$ — эмпирические центральные моменты третьего и четвертого порядка; σ_t — среднеквадратичное отклонение; $\bar{t} = \sum_{i=1}^N t_i / n$ — среднее время.

Среднеквадратичные отклонения σ_S от S и σ_E от E определим по известным формулам математической статистики [4]:

$$\sigma_S = \sqrt{\frac{6(n-1)}{(n+1)(n+3)}}, \quad \sigma_E = \sqrt{\frac{24(n-2)(n-3)}{(n-1)^2(n+3)(n+5)}}. \quad (7)$$

Для агрегатов ГПА-10 эмпирические асимметрия и эксцесс и их среднеквадратичные отклонения соответственно равны: $S = 0,76$; $\sigma_S = 0,46$; $E = 0,15$; $\sigma_E = 0,81$. В этом случае выполняются неравенства $S > \sigma_S$ и $E < \sigma_E$, поэтому логарифмически нормальное распределение отвергается и требуется проверка согласия эмпирического распределения с распределением Вейбулла–Гнеденко [4]. Проверку согласия гипотезы эмпирического распределения с теоретическим проводим с помощью критерия Пирсона с двумя малыми уровнями значимости. Статистикой критерия является величина η^2 , вычисляемая по формуле [5]:

$$\eta^2 = n \sum_{i=1}^l [v(t_i) - P_i]^2 / P_i, \quad (8)$$

где P_i — теоретическая вероятность отказа в i -м интервале; l — число степеней свободы.

При достаточно большом n статистика η^2 подчиняется распределению χ^2 -квадрат с $(l-1)$ степенями свободы. Проверку согласия проведем для функции распределения вероятности отказов $F(t)$ случайной величины t Вейбулла–Гнеденко, которая имеет следующий вид:

$$F(t) = 1 - \exp(-t^\gamma/\beta); t \geq 0, \quad (9)$$

где γ и b — параметры распределения.

Параметры распределения γ и b находим методом квантилей, для чего выбираем две квантили θ_1 и θ_2 , со следующими эмпирическими вероятностями [5]:

$$\begin{aligned} P(\theta_1) &= 1 - v(\theta_1) = 1 - m(\theta_1)/n, \\ P(\theta_2) &= 1 - v(\theta_2) = 1 - m(\theta_2)/n. \end{aligned} \quad (10)$$

Очевидно что

$$P(\theta) = \exp(-\theta^\gamma/\beta). \quad (11)$$

Приведем выражение (11) к линейному виду, прологарифмировав его:

$$\ln P^{-1}(\theta) = \theta^\gamma/\beta; \ln \ln P^{-1}(\theta) = \gamma \ln \theta - \ln \beta. \quad (12)$$

Подставив θ_1 и θ_2 в уравнение (12) и заменив $P(\theta) = 1 - v(\theta)$, получим систему двух уравнений относительно γ и β :

$$\begin{aligned} \ln \ln(1 - v\theta_1)^{-1} &= \gamma \ln \theta_1 - \ln \beta, \\ \ln \ln(1 - v\theta_2)^{-1} &= \gamma \ln \theta_2 - \ln \beta. \end{aligned} \quad (13)$$

Решение системы уравнений (13) дает следующие значения для γ и β :

$$\begin{aligned} \gamma &= [\ln \ln(1 - v\theta_1)^{-1} - \ln \ln(1 - v\theta_2)^{-1}] / [\ln \theta_1 - \ln \theta_2], \\ \beta &= \theta_1^\gamma / \ln(1 - v\theta_1)^{-1}. \end{aligned} \quad (14)$$

В результате расчетов по формуле (14) для агрегата ГПА-10 получим: $\gamma = 2,1$; $\beta = 4,6 \cdot 10^7$; вероятность безотказной работы $P_x(t)$ при распределении Вейбулла-Гнеденко выразим формулой:

$$P_x(t) = 1 - F(t) = \exp(-t^\gamma/\beta). \quad (15)$$

Для вычисленных параметров распределения γ и β и критериев согласия (8) расчеты показывают, что гипотеза о согласии эмпирического распределения с распределением Вейбулла-Гнеденко принимается для следующих уровней значимости 0,1 и 0,05.

Дополнительно проверку согласия теоретического и эмпирического уравнения вероятности безотказной работы (15) проверим по критерию Колмогорова. Для этого вычислим параметр $\lambda = \Delta P_x(t) \sqrt{n}$, где $\Delta P_x(t)$ — максимальное значение разности теоретического и эмпирического распределений. Вероятность имеющего место расхождения для агрегатов ГПА-10 равна $P(\lambda) = 0,6$, т. е. значительно больше 0,01. Отсюда можно сделать вывод [5], что согласие достаточно хорошее и теоретический закон распределения Вейбулла-Гнеденко выбран правильно.

Выражение для вероятности безотказной работы ГПА (15) получено в функции времени наработки ГПА. Для того, чтобы в соотношении (15) внести вместо параметра времени наработки соответствующее значение виброскорости необходимо получить зависимость изменения вибрации ГПА во времени. Согласно литературным данным прак-

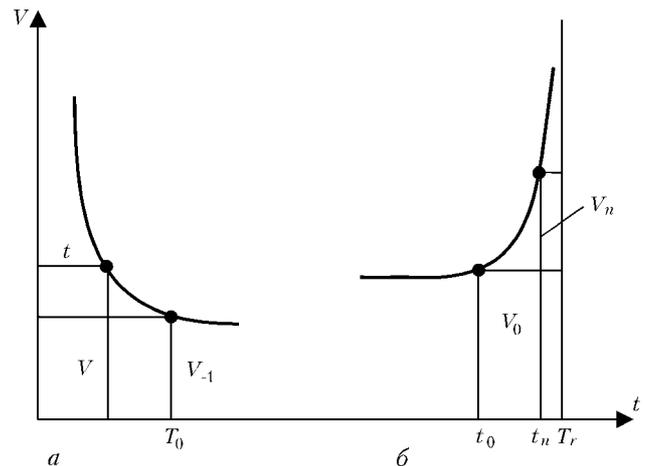


Рис. 2. Изменение вибрации ГПА во времени: а — виброиспытания при $V = \text{const}$ (кривая усталости); б — виброиспытания в процессе наработки (тренд)

тически встречающаяся динамика увеличения уровня вибрации от времени наработки описывается аналитическими зависимостями, графики которых укладываются между прямой линией и экспонентой [6]. Для расчета на их основе текущих уровней вибрации требуется знание предельно допустимых значений, что является неразрешимой задачей в рамках сформулированной в данной работе цели. В связи с этим предлагается метод оценки уровней вибрации, основанный на физике процессов, протекающих в агрегате при его деградации в виде [7]:

$$V^m(T_r - t) = \text{const}, \quad (16)$$

где T_r — полный ресурс; m — показатель степени, зависящий от увеличения уровней вибрации в зависимости от текущей наработки t .

Преобразуем формулу (16) к виду, удобному для практических расчетов:

$$t = T_r - \frac{V_0^m}{V^m} (T_r - t_0), \quad (17)$$

где постоянная определяется из начальных условий (рис. 2) как произведение уровня вибрации V_0 в степени m (начало гиперболического роста V), зафиксированного при наработке t_0 , на соответствующий этой амплитуде остаточный ресурс $(T_r - t_0)$.

Формула (17) содержит три неизвестных параметра T_r , t_0 и m , которые определяются в процессе выполнения процедуры аппроксимации экспериментальных данных, представляющих собой массив значений уровней вибрации V_i , зафиксированных при наработках t_i конкретного ГПА.

Поскольку соотношение (17) используется для нахождения предельных значений V_n при вычислении трех неизвестных параметров, реализуем иной подход, основанный на статистических данных испытаний всего парка ГПА. Определим ресурс агрегата как математическое ожидание времени безотказной работы $M(t)$ в виде [4]:

$$T_r = M(t) = \beta^{-\gamma} \Gamma(1 + \gamma^{-1}), \quad (18)$$

где $\Gamma(x)$ — гамма-функция x .



Установлено, что для среднестатистического агрегата [6] среднее время наработки t_0 составляет $t_0 = 0,75T_r$. Тогда время наработки агрегата t_n , соответствующее предельному значению V_n , определим из уравнения (17):

$$t_n = T_r(1 - V_0^m/4V_n^m). \quad (19)$$

Подставляя (18) и (19) в (15), получаем вероятность безотказной работы ГПА в функции V_n :

$$P_x(V) = \exp[-\Gamma^{-1}(1 + \Gamma^{-1})(1 - V_0^m/4V_n^m)^\gamma]. \quad (20)$$

Уровень вибрации V_0 определяем по результатам длительных испытаний парка ГПА на усталость. Для описания кривой усталости удобно использовать уравнение, предложенное Вейбуллом [8], в следующем виде:

$$V^k t = V_{-1}^k T_0, \quad (21)$$

где V^{-1} — предел выносливости (наибольшее значение постоянного уровня вибрации, которое может выдержать агрегат без разрушения при числе циклов, соответствующем точке перелома на кривой усталости); T_0 — временной эквивалент числа циклов, соответствующих точке перелома кривой усталости (см. рис. 2); k — параметр кривой усталости (показатель степени, зависящий от физической природы накопленных усталостных повреждений [8]).

Здесь в отличие от формулы (16) время t соответствует фиксированному значению уровня вибрации V .

Определим постоянную из начальных условий по уравнению Вейбулла [21] аналогично (16) и (17):

$$V_{-1}^k T_0 = V_0^m t_0 + \int_{t_0}^{t_n} \frac{V_0^m (T_r - t_0)}{T_r - t} dt. \quad (22)$$

После интегрирования соотношение (22) примет следующий вид:

$$4V_{-1}^k T_0 = V_0^m T_r (3 + m \ln |V_n/V_0|). \quad (23)$$

Экспериментально установлено, что среднее значение отношения V_n/V_0 , когда происходят опасные изменения в техническом состоянии любых роторных машин [6], равно десяти (20 дБ). С учетом последнего, из (23) получим окончательное выражение для нахождения V_0 в виде:

$$V_0^m = \frac{4V_{-1}^k T_0}{(3 + m \ln 10) T_r}. \quad (24)$$

Приводим пример расчета предельных значений общего уровня вибрации газоперекачивающего агрегата ГПА-10, эксплуатируемого на компрессорных станциях (КС) ДК «Укртрансгаз». В качестве предельных значений выбрана следующая оценка [1, 3]:

$$V_n = 2 \sqrt{M(V^2)}, \quad (25)$$

где $M(V^2)$ — математическое ожидание квадрата виброскорости (начальный момент второго порядка).

Статистические экспериментальные данные получены при виброиспытании в эксплуатационных условиях парка агрегатов в управлении магистральных газопроводов «Киевтрансгаз» на КС «Ромненская», «Зеньков» и «Решетиловка». Измерение виброскорости проводилось на корпусах подшипников в четырех точках двигателя в соответствии с действующей методикой [6]. Использовались обычные виброметры, аппаратура спектрального анализа фирмы «Брюль и Кьер» и коллекторы сборщики «Микролог» и «Диамех». Предельное значение существующих норм вибрации, замеренной в штатных точках измерений, составляет 30 мм/с. Для указанной оценки (25) параметры «вибораспределения» z , P_V и безотказной работы P_x соответственно равны 2,4; 0,3 и 0,76. При этом предельное среднеквадратичное значение виброскорости составляет 14 мм/с.

Предельное значение V_n по результатам расчетов удовлетворяют гипотезе H («Ремонт не нужен»). При этом $K = 3,8$, т. е. $3 < K \leq 10$ и в случае ошибки в принятии гипотезы H произойдут поломки с опасными последствиями. Здесь следует заметить, что существующие предельные нормы вибрации намного выше предлагаемых расчетных. Такие значения уровней вибрации снижают ресурс агрегатов и могут приводить к остановкам и авариям на различной стадии их эксплуатации, что и наблюдается в действительности на КС [6].

Дальнейшую градацию норм вибрации с оценкой: «Требуется принятие мер» можно получить в соответствии с рекомендациями Международных стандартов ИСО 2372, UDI 2056 и существующих норм, уменьшая предельный уровень V_n в 2,5 раза (8 дБ). Затем следующую градацию норм: «Допустимо» получим, уменьшая V_n на 16 дБ [1, 3].

Выводы

1. Рассмотрено применение нового подхода к нормированию общего уровня виброскорости по статистическим данным виброобследований большого парка ГПА, что позволяет установить научно обоснованные нормы вибрации для отдельных точек измерений вибрации на агрегате. Примененный подход реализован с помощью критерия Неймана-Пирсона и обобщает традиционные методы нормирования, базирующиеся на рекомендациях ИСО.

2. Приведен числовой пример, основанный на полученной плотности вероятности виброскорости парка ГПА (вибораспределение) и вероятности безотказной работы (распределение Вейбулла-Гнеденко). Числовой пример показывает, что в качестве оценки предельных уровней вибрации следует использовать оценку, равную удвоенному корню квадратному из величины центрального момента второго порядка случайной виброскорости парка ГПА.

3. Существующие нормы и предельные уровни вибрации агрегата ГПА-10 значительно выше расчетных, т. е. для его надежной эксплуатации при таких нормах требуются дополнительные затраты. Приведение норм к расчетным значениям позволит



продлить ресурс ГПА и их безаварийную эксплуатацию без дополнительных затрат.

1. *Игуменцев Е. А., Марчук Я. С., Гетьманенко С. В.* Нормирование вибрации газоперекачивающих агрегатов // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2002. — № 3. — С. 7–12.
2. *Sempel C.* Determination of vibration symptom limit value in diagnostics of machinery. — Maintenance Management International. — 1985. — № 5. — С. 297–304.
3. *Игуменцев Е. А., Прокопенко Е. А., Марчук Я. С.* Статистические критерии при нормировании вибрации газоперекачивающих агрегатов // Вестник Нац. техн. ун-та «Харьковский политехнический институт». Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. — Харьков: НТУ «ХПИ». — 2003. — № 10. — С. 169–173.
4. *Александров А. В.* Некоторые вопросы эксплуатационной надежности газотурбинных установок магистральных газопроводов. — М: ВНИИГазпром, 1969. — 73 с.
5. *Гихман И. И., Скороход А. В., Ядренко М. И.* Теория вероятностей и математическая статистика. — Киев: Вища школа. — 1979. — 408 с.
6. *Игуменцев Е. А., Работягов В. И., Шмидт В. В.* Методика вибродиагностики технического состояния газоперекачивающих агрегатов ГПА-10 и ГПА-10-01 в условиях эксплуатации на компрессорных станциях газовой промышленности // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1996. — № 1. — С. 11–20.
7. *Маки С.* Методы стимулирования прогнозирования сохранения оборудования с точки зрения анализа вибрации / Пер. с япон. // Экспресс-информация «Надежность и контроль качества», ВИНТИ, 1990. — № 13. — С. 14–20.
8. *Серенсен С. В., Козаев В. П., Шнейдерович Р. М.* Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. — М: Машиностроение. — 1975. — 488 с.

Укр. инж.-педагогич. академия, г. Харьков,
Управление магистральн. газопроводов «Киевтрансгаз»

Поступила в редакцию
10.11.2003



Украинский информационный Центр
«НАУКА. ТЕХНИКА. ТЕХНОЛОГИЯ»
ПРОГРАММА РАЗВИТИЯ ООН



02094, г. Киев, ул. Минина, 3, к. 47, тел./факс: (+38 044) 573 30 40
E-mail: office@conference.kiev.ua, www.conference.kiev.ua
Почтовый адрес: 02094, г. Киев, а/я 41

приглашает Вас принять участие в работе

Одиннадцатой международной конференции и выставки

«Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики»

Дата и место проведения: 20–24 сентября 2004 г. в г. Ялта, в конференц-зале пансионата «Дружба»

Организаторы конференции:

Украинский информационный Центр «НАУКА.ТЕХНИКА.ТЕХНОЛОГИЯ»
Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики
Российское общество неразрушающего контроля и технической диагностики
Беларуская асоцыяцыя неразрушаючага кантроля і тэхнічнага дыягностыкі
Днепропетровский национальный университет
НПП «Машиностроение»

Генеральный спонсор: НПФ «ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ»

Информационная поддержка:

Журналы: «Техническая диагностика и неразрушающий контроль», «В мире неразрушающего контроля»
Информационный бюллетень УО НКТА
Сайт УО НКТА в Интернете: www.usndt.com.ua

Тематика конференции:

- ☞ Общие вопросы НК и ТД
- ☞ Теоретические вопросы взаимодействия физических полей с веществом контролируемых объектов
- ☞ Средства, системы, методики НК и ТД
- ☞ Эксплуатационные характеристики и определение остаточного ресурса изделий
- ☞ Метрологическое обеспечение средств НК
- ☞ Вопросы подготовки и аттестации специалистов, аккредитация подразделений НК и ТД
- ☞ Выполнение Законов Украины «О стандартизации», «О подтверждении соответствия», «Об аккредитации органов по оценке соответствия» — путь повышения конкурентоспособности украинской продукции
- ☞ Разработка стандартов в области НК и ТД
- ☞ Заседание Правления УО НКТА

Информация о выставке:

Выставка состоится 21, 22 сентября 2004 г.
Экспоненты сообщают об участии в выставке вместе с заявкой на участие в конференции

Контрольные даты:

Тезисы докладов — до 15 августа 2004 г.
Заявка на участие, бронирование мест — до 1 сентября 2004 г.
Оплата оргвзноса — до 15 сентября 2004 г.
Заезд участников (обед, ужин) — 20 сентября 2004 г., отъезд (завтрак) — 24 сентября 2004 г.

ПОВЫШЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ РЕГИСТРИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ К ЖЕСТКОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ И СНИЖЕНИЕ ВРЕМЕНИ ИХ ЭКСПОЗИЦИИ В РЕНТГЕНОДЕФЕКТОСКОПИЧЕСКОМ КОНТРОЛЕ

О. В. МИХАЙЛОВ, П. В. ТЕРЕХОВ, А. В. КОНДАКОВ, Д. Ш. МУРАТОВ, А. С. ХАБИБУЛЛИН

Предложен и апробирован процесс усиления серебряных изображений на галогенсеребряных радиографических пленках для промышленного радиографического контроля, основанный на повышении степени дисперсности слагающего изображение элементного серебра. Показано, что при использовании данного процесса оптические плотности изображения в широком (0,5...2,0 ед) диапазоне возрастают в 3-5 раз, следствием чего является повышение почти на порядок фотографической чувствительности $S_{0,85}$ и $S_{2,00}$ при сохранении или незначительном увеличении градиента g , плотности вуали D_0 и разрешающей способности фотоматериала.

An approved process is proposed for enhancement of silver images on halogen-silver radiographic films for industrial radiographic control, based on increasing the degree of dispersity of elemental silver, making up the image. It is shown, that when this process is used, optical densities of the image in a broad (0.5 - 2.0 un.) range rise 3 to 5 times, which results in increase of photographic sensitivity of $S_{0,85}$ and $S_{2,00}$ by almost an order, with preservation or slight increase of g gradient, D_0 fog density and photomaterial resolution.

Как известно, одной из весьма серьезных проблем радиографического контроля является относительно низкая чувствительность используемого для этой цели регистрирующего материала — галогенсеребряных рентгеновских пленок — к рентгеновскому и γ -излучению, вследствие чего для достижения оптимальных значений оптических плотностей изображения объекта после проявления и фиксирования экспонированной фотопленки требуются весьма продолжительное время ее экспозиции (иногда до 1 ч и даже более). Естественно, указанное обстоятельство существенно снижает оперативность данного вида контроля. Использование относительно высокочувствительных ($S_{0,85} = 30...40 \text{ p}^{-1}$) пленок позволяет сократить время «просвечивания», однако такие пленки содержат 10 и более граммов серебра на 1 м^2 поверхности фотоматериала, что при нынешнем дефиците этого драгоценного металла представляется весьма значительным. Кроме того, пленки подобной чувствительности имеют, как правило, низкую разрешающую способность, что существенно снижает качество изображения и затрудняет выявление дефектов на объектах. Перспективным приемом для решения указанной выше проблемы может быть повышение оптических плотностей (так называемое усиление) фотографического изображения посредством его дополнительной обработки с использованием специфических химических процессов, которые можно разделить на три группы [1, 2]:

процессы, в результате которых носителем усиленного изображения оказывается только элементное серебро;

процессы, в результате которых носителем усиленного изображения оказывается элементное се-

ребро плюс еще как минимум одно иное химическое соединение;

процессы, в результате которых носителем усиленного изображения оказывается только как минимум одно иное химическое соединение.

В первом из перечисленных вариантов, когда усиленное фотографическое изображение (равно как и исходное) содержит только элементное серебро, его качество не должно сколько-нибудь существенно ухудшиться по сравнению с качеством первоначального изображения. Проблема, однако, состоит в том, как добиться достаточно значительного прироста оптических плотностей изображения по сравнению с таковыми для первоначального. Теоретически можно ожидать, что это произойдет, если в результате дополнительной обработки возрастет степень дисперсности элементного серебра (подобный прием был описан в работе [3]).

В данной статье авторы поставили целью изучение возможностей одного из вариантов усиления с так называемым переосаждением серебра, в рамках которого на первой стадии имеет место окисление элементного серебра $\text{Ag}(0) \rightarrow \text{Ag}(I)$, а на второй — восстановление $\text{Ag}(I) \rightarrow \text{Ag}(0)$, для улучшения фотографических характеристик современных рентгеновских пленок.

В эксперименте использовали рентгеновские пленки типов РТ-1, РТ-К, РТ-5Д, РТ-7Т, РТ-12, РТ-14 и НН-15, выпускаемые ОАО «Тасма-Холдинг» (г. Казань, Россия), а также пленки РТ-1В и РТ-4М, выпускаемые ОАО «Свема» (г. Шостка, Украина). Образцы этих пленок в соответствии со стандартом [3] экспонировали рентгеновским излучением с дозой облучения на 15-м поле сенситометрического клина 0,8 или 1,6 рентген (в

зависимости от типа испытуемой рентгеновской пленки), проявляли в стандартном проявителе D-19 в течение 6 мин при 20 °С, промывали в проточной воде 2 мин, фиксировали в 25%-ном водном растворе тиосульфата натрия в течение 10 мин при 20... 25 °С и промывали в проточной воде 15 мин, после чего высушивали при комнатной температуре. Экспонирование указанных пленок проводили в полной темноте, проявление, промывку и фиксирование — при неактивном для данных фотоматериалов желто-зеленом освещении, завершающую промывку и сушку — при естественном освещении. Полученные образцы пленок с серебряным изображением далее последовательно подвергали:

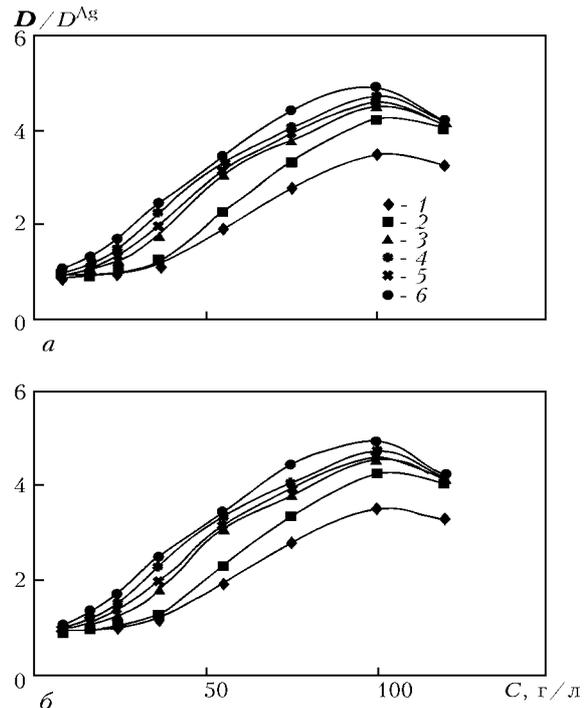
отбеливанию в водном растворе, содержащем красную кровяную соль, бромид калия, гидроксид калия и карбонат натрия, в течение 1...2 мин при 20... 25 °С;

промывке проточной водой в течение 1 мин;

усилению в водном растворе, содержащем хлорид олова (II), трилон Б, гидроксид калия и тиоцианат (роданид) калия в течение 1 мин при 20... 25 °С.

По завершении этой процедуры полученные образцы промывали проточной водой 10 мин и высушивали при комнатной температуре. На полученных образцах рентгеновских пленок измеряли значения оптических плотностей первоначального (D^{Ag}) и усиленного (D) серебряного изображения и по этим данным рассчитывали степень усиления (D/D^{Ag}) для различных вариантов изучаемого процесса усиления. Примеры зависимостей (D/D^{Ag}) от количества тиоцианата калия в усилителе для значений D^{Ag} в диапазоне 0,40... 1,60 представлены на рисунке. Измерения величин D и D^{Ag} проводили с помощью денситометра Masebeth TD504 (Kodak, США) за синим светофильтром с максимумом пропускания при $\lambda = 450$ нм.

Из рисунка видно, что в результате процесса усиления отмечается существенный (в некоторых случаях почти 5-тикратный!) прирост оптической плотности усиленного изображения по сравнению с таковой для первоначального. Окраска подобного изображения варьирует от черно-коричневой до темно-коричневой. Химический анализ его носителя свидетельствует о том, что оно более чем на 99,9 % состоит из элементного серебра. Рентгенофазовый же анализ этого носителя свидетельствует о наличии в нем двух различных фаз, что в свою очередь указывает на присутствие в нем двух разновидностей частиц элементного серебра. Частицы первой из них, судя по всему, имеют степень дисперсности, близкую к таковой для частиц, слагающих первоначальное черно-белое серебряное изображение, и вносят в усиленные изображения серо-черные тона, тогда как частицы второй разновидности, имеющую более высокую дисперсность, красные тона. Степень усиления изображения (D/D^{Ag}) непосредственно связана с соотношением между количествами этих частиц в полученном усиленном изображении: чем больше доля частиц второй разновидности в нем, тем более значительной оказывается и указанная величина. При этом с ростом концентрации роданида калия



Зависимости (D/D^{Ag}) от количества тиоцианата калия в усилителе при оптической плотности исходного фотографического изображения: а — 0,40 (1), 0,50 (2), 0,75 (3), 0,95 (4), 1,15 (5) и 1,60 (6) для рентгеновской пленки РТ-1В; б — 0,42 (1), 0,53 (2), 0,74 (3), 1,00 (4), 1,20 (5) и 1,57 (6) для рентгеновской пленки РТ-4М

количество частиц второй категории увеличивается, тогда как первой — напротив, уменьшается. Соотношение же этих количеств зависит от концентрации тиоцианата калия, но практически не зависит от типа используемой в эксперименте рентгеновской пленки. Измерения разрешающей способности полученных описанным способом усиленных серебряных изображений показали, что она практически не изменяется по сравнению с разрешающей способностью первоначального изображения для каждой из перечисленных выше рентгеновских пленок. В этой связи имеются все основания утверждать, что ухудшения качества изображения в результате использования описанного нами варианта усиления не должно иметь места. Фотографические характеристики для некоторых усиленных изображений представлены в таблице.

Можно наметить четыре варианта практической реализации тех потенциальных возможностей, которые заложены в описанном выше способе:

1) сокращение времени экспозиции в процессе радиографического контроля изделий и материалов при сохранении неизменной или повышении оптической плотности фотографического изображения;

2) повышение чувствительности радиографического контроля за счет применения мелкозернистых рентгеновских пленок, чувствительность которых в результате усиления может быть доведена до уровня чувствительности крупнозернистых;

3) повышение фотографической чувствительности пленок с сохранением нормативного содержания серебра в них;

4) сокращение расхода серебра в процессе изготовления фотоматериалов для промышленной и

Рентгеносенситометрические показатели усиленного фотографического изображения на пленках РТ-1 и РТ-К, полученного в результате переосаждения элементного серебра

Количество тиоцината калия в усилителе, г/л	$S_{0,85}, p^{-1}$	$S_{2,00}, p^{-1}$	γ	$g_{1,5...2,5}$	D_0	Нанос Ag, г/м ²
Пленка РТ-1						
Исходный фотоматериал	33	14,0	4,0	3,4	0,05	13,5
—	30	13,0	4,1	3,6	0,05	13,5
8,0	32	16,0	5,2	4,5	0,04	13,5
16,0	40	22	5,5	4,7	0,04	13,5
24,0	55	28	4,0	3,5	0,04	13,5
36,0	75	40	5,1	4,0	0,04	13,5
55,0	120	70	4,7	4,5	0,05	13,5
75,0	180	80	4,5	4,2	0,05	13,5
95,0	250	110	4,2	3,2	0,11	13,5
120,0	230	100	3,9	2,8	0,15	13,5
Пленка РТ-К						
Исходный фотоматериал	5,0	1,5	4,5	4,0	0,03	12,5
—	4,7	1,4	4,9	4,4	0,02	12,5
8,0	5,0	1,5	5,4	4,7	0,02	12,5
16,0	5,5	2,0	5,7	5,1	0,02	12,5
24,0	7,5	3,0	5,5	4,8	0,03	12,5
36,0	9,8	4,3	5,3	4,6	0,03	12,5
55,0	15,5	7,3	5,0	4,5	0,04	12,5
75,0	24	8,2	4,7	4,4	0,05	12,5
95,0	40	13	4,5	4,2	0,07	12,5
120,0	34	12	4,3	3,5	0,09	12,5

медицинской радиографии с сохранением нормативных сенситометрических и структурометрических показателей.

Опираясь на данные, приведенные в таблице и на рисунке (они определяются заранее опытным путем непосредственно у потребителя), а также на аналогичные им по другим типам рентгенпленок, можно подобрать степень усиления (D/D^{Ag}) или соотношение чувствительностей $S_{0,85}/S_{0,85}$ ($S_{0,85}$ — чувствительность соответствующей рентгенпленки, достигаемая в результате использования рассматриваемого процесса усиления изображения; $S_{0,85}$ — чувствительность той же пленки, достигаемая в результате проведения стандартной химико-фотографической обработки по стандарту [4] таким образом, чтобы сохранить уже достигнутые ранее те оптимальные значения оптической плотности фотографического изображения, которые использовались при детектировании соответствующего объекта. В таком случае реализуется вариант 1), при котором существенно сокращается время экспонирования детектируемого объекта ионизирующим излучением. Вследствие этого, с одной стороны, повышается оперативность радиографического контроля, с другой — существенно снижаются дозы облучения детектируемого материала, а также персонала, работающего с источниками ионизирующего излучения. Кроме того, расширяется возможность использования мелко-

зернистых рентгеновских пленок типа РТ-К или РТТ-4М, обладающих высокой разрешающей способностью, в практике дефектоскопического контроля. Вследствие низкой их чувствительности к ионизирующему излучению эта их способность, как правило, не раскрывается в полном объеме, поскольку для достижения необходимых для детектирования оптических плотностей требуются весьма значительная продолжительность экспонирования анализируемого объекта. Длительное же «просвечивание» детектируемого объекта жестким ионизирующим излучением далеко не всегда оказывается технически возможным, и применение предлагаемого нами способа усиления изображения позволяет преодолеть этот недостаток мелкозернистых рентгенпленок, снизив время экспонирования до практически приемлемого уровня с сохранением оптимальных значений оптической плотности изображения. Поскольку мелкозернистые низкочувствительные рентгеновские пленки имели более высокую разрешающую способность по сравнению с крупнозернистыми высокочувствительными, то в результате замены вторых на первые автоматически повышается и чувствительность радиографического контроля. Именно это и предусматривается вариантом 2), который, на наш

взгляд, вообще является наиболее важным из всех рассмотренных путей реализации данного способа. И наконец, в рамках варианта 3) появляется возможность увеличения фотографической чувствительности почти на порядок, причем этот прирост по существу не зависит от типа обрабатываемой рентгенпленки. Например, в случае РТ-1 наблюдается прирост чувствительности $S_{0,85}$ от 30 до 250 p^{-1} , $S_{2,00}$ — от 14 до 120 p^{-1} , РТ-К — от 50 до 40 и от 1,5 до 13 p^{-1} (таблица), РТ-1В — с 30 до 220 и 15 до 125 p^{-1} , РТ-4М — с 6,5 до 50 и 1,3 до 11 p^{-1} соответственно. Отметим в этой связи, что аналогичный в количественном отношении прирост чувствительности имеет место и в случае других указанных выше рентгеновских пленок. В результате появляется возможность повысить оптические плотности изображения, если по каким-либо причинам они оказываются недостаточно высокими для проведения детектирования (в частности вследствие значительной толщины стенок «просвечиваемого» объекта и в то же время необходимости ограничения продолжительности детектирования с использованием того или иного источника ионизирующего излучения).

Варианты 1)–3) могут быть реализованы у потребителя рентгеновских пленок. Значительные потенциальные возможности предлагаемого нами процесса, однако, могут быть задействованы и у изготовителя таких пленок — уже в рамках ва-



рианта 4). В данном случае может быть организован выпуск соответствующих типов рентгеновских пленок, имеющих нормативные фотографические характеристики ($S_{0,85}$, $S_{2,00}$, γ , $g_{1.5...2.5}$ и D_0), но субнормативное (т. е. сниженное по сравнению с номиналом) содержание в них серебра. Подобные пленки могут выпускаться вместе с комплектом реагентов, входящих в состав обрабатывающих (т. е. отбеливающего и усиливающего) растворов, которые приготавливаются уже в процессе эксплуатации их потребителем. Комплект реагентов может быть представлен для использования или в жидком (концентратов каждого из обрабатывающих растворов, которые перед употреблением доводятся до нужного объема водой), или же в твердом виде (смеси твердых веществ, входящих в состав указанных растворов, которые готовятся у потребителя путем растворения этих смесей в определенных количествах воды). Благодаря этому, как нетрудно заметить, у изготовителя рентгеновских пленок появляется весьма существенный дополнительный резерв экономии драгоценного металла — серебра. В тех же случаях, когда при изготовлении рентгеновских пленок используются усиливающие экраны (например, свинцовые), появляется еще одна возможность — сохранив нормативное содержание серебра в соответствующих пленках, обойтись без использования этих экранов при выпуске таких пленок, обеспечив за счет описанного выше процесса необходимую степень усиления изображения и тем самым его оптимальные оптические плотности, необходимые для детектирования. В данном случае изготовитель также может добиться определенной экономии за счет снижения фактической себестоимости выпускаемых им пленок подобных типов.

Вывод

Предлагаемый нами процесс дополнительной обработки серебряного изображения занимает всего 3–4 мин (1–2 мин — отбеливание, 1 мин — промывка и 1 мин — усиление). Он может быть осуществлен в рамках любой фотолаборатории и не требует какой-либо дополнительной квалификации работников. Специально проведенные нами эксперименты показали, что используемые в рамках данного способа обрабатывающие растворы (как отбеливающий, так и усиливающий) мало критичны к качеству воды, и могут быть приготовлены как на дистиллированной, так и на технической (водопроводной) воде, типичной для большинства потребителей рентгеновских пленок. Вследствие этого описанный способ может без особых проблем использоваться в практике рентгенодефектоскопических работ. Отметим в заключение, что в качестве добавки в усиливающем растворе помимо роданида калия могут быть использованы и некоторые другие химические соединения, причем как неорганические (тиосульфат натрия), так и органические (1,2-этилendiамин, моноэтаноламин).

1. Джеймс Т. Х. Теория фотографического процесса. — Л.: Химия, 1980. — 680 с.
2. Михайлов О. В. // Журн. научн. и прикл. фотокинематографии. — 1991. — 34, № 3. — С. 344–355.
3. Радиографический контроль с усилением снимков по методу диспергирования серебра / Хвалюк В. Н., Врублевский А. Б., Кисель Л. Ф. и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1991. — № 2. — С. 90–92.
4. ОСТ 6-17-54-80. Материалы фотографические черно-белые на прозрачной основе. Метод рентгеноситиметрического испытания рентгенографических и флюорографических пленок. — М.: Гос. комитет СССР по стандартам, 1980.

Казанск. гос. технолог. ун-т,
ОАО «Гасма-Холдинг»,
Казань, Россия

Поступила в редакцию
09.06.2003

XVIII ПЕТЕРБУРГСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ

1–3 июня 2004 г.

Тематика

- Новые функциональные решения и принципы построения приборов и преобразователей ультразвукового контроля
- Методические принципы, технологии и опыт применения ультразвукового контроля на базе автоматизированных и микропроцессорных средств
- Метрологическое обеспечение и стандартизация ультразвукового контроля

Организационный комитет

НК-Центр, 196070, Санкт-Петербург, а/я 105

Тел./факс: (812) 310 33 26, 122 65 46,

e-mail: utm2004@ndt.sp.ru http://www.ndt.sp.ru

Конференция проводится в г. Зеленогорск на живописном побережье
Финского залива в 50 км от Санкт-Петербурга



ОСОБЛИВОСТІ СТРУМИННОЇ ОБРОБКИ ВНУТРІШНІХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ ПРИ КАПІЛЯРНОМУ КОНТРОЛІ

А. М. ОВСЯНКІН, В. Г. ДЕМИДКО, Є. О. ШКВАР

Розглянуто проблеми використання струменних течій при капілярному контролі внутрішніх циліндричних поверхонь конструкцій. Наведено основи побудови інженерного та теоретичного методів розрахунку характеристик газорідних струминних течій, які використовуються для нанесення дефектоскопічної рідини на поверхню з метою дослідження цілісності останньої. Показано, що на ефективність контролю впливають як геометричні особливості поверхні, що досліджується, так і різноманітні параметри струменя.

The problems make use of jet flows of capillary analysis of cylindrical inner surfaces have been considered. The basis of constructing of both engineering and theoretical methods of liquid-gas jet flows properties predictions is carried out. The mentioned jet flows are applied for covering the investigated surface by flow-detection liquid with the aim of discontinuity detection. It was shown that the effectiveness of discontinuity test depends on both surface geometrical phenomena and different parameters of jet flow.

В роботах [1–3, 11] представлено основні вимоги до капілярного контролю сучасних авіаційних конструкцій при їх виробництві і експлуатації, а також методи і засоби реалізації контролю порожнистих елементів.

При обробці дефектоскопічними матеріалами внутрішніх циліндричних поверхонь за допомогою форсунок результати контролю залежать від швидкісних характеристик газорідного струменя. При цьому необхідно враховувати кут зустрічі струменя з поверхнею, що оброблюється. В роботі [11] розглянуто рівняння зміни статичного тиску і швидкості рідини у струмені, що також важливо для результатів обробки.

Для характеристик струменя з симетричним розпилюванням (рис. 1) запропонований інженерний розрахунковий метод. В результаті отримані рівняння зміни статичного тиску у струмені і зміни швидкості потоку по його осям внаслідок перетоку газу з периферії в середину факела:

$$\frac{dp}{dz} = -\rho_{гп}\omega_{гп} \frac{d\omega_{гп}}{dz}.$$

Рівняння зміни швидкості рідини по осям j (наприклад, по y або z):

$$\frac{d\omega_{pzj}}{dz} = -C_{kj} \frac{0,75\rho_r\omega_0(\omega_{pzj} - \omega_{r\phi})}{\rho_p d_{kj}\omega_{pzj}} + \frac{g}{\omega_{pzj}}, \quad (1)$$

$$\frac{d\omega_{pyj}}{dz} = -C_{kj} \frac{0,75\rho_r\omega_0\omega_{pyj}}{\rho_p d_{kj}\omega_{pzj}}, \quad (2)$$

де C_k — коефіцієнт гідродинамічного опору; ρ_{k+1} — щільність речовини $k+1$ (дисперсійної) фази; d_k — діаметр крапель; ρ_p, ρ_r — щільність рідинної та газової складових струменя відповідно; g — вектор прискорення вільного падіння; ω — швидкість рідинної фази центрального струменя; ω_l — проекція швидкості рідини на її напрям l .

Метою даної статті є продовження аналізу параметрів струминної течії при обробці внутрішніх поверхонь для побудови математичної моделі руху струменя.

Побудова теоретичного розрахункового методу. Метою, яку будемо досягати при побудові теоретичних моделі і відповідного до неї методу розрахунку, вважатимемо їх спроможність визначити розподіли швидкостей, концентрації фази, що переноситься, а також нормальних і дотичних напружень в області формування течії струменя. Отже, формалізуємо задачу наступним чином.

Геометричні і режимні параметри, що характеризують течію. Описану вище конфігурацію характеризуватимемо наступними основними геометричними параметрами (рис. 2): D — діаметр сопла форсунки; S — відстань від сопла до поверхні. Течія, що розглядається, також характеризується об'ємними витратами газу і рідкої фази, які позначатимемо Q_1 та Q_2 відповідно. В розрахунках згідно загальноприйнятої технології чисельних обчислень доцільніше користуватись безрозмірними геометричними параметрами. В якості параметрів, за якими будемо здійснювати безрозмірю-

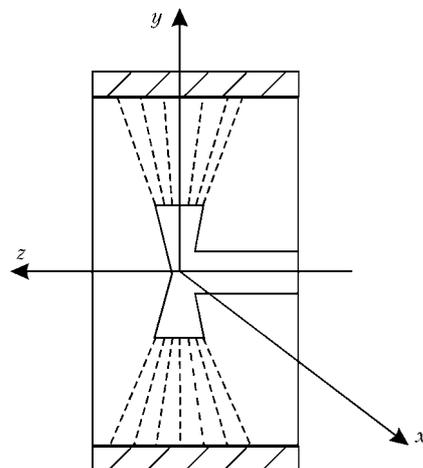


Рис. 1. Нанесення індикаторного пенетранту

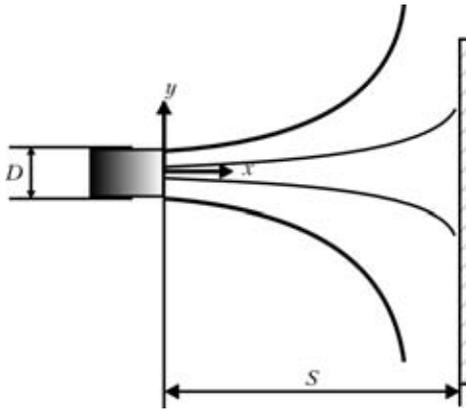


Рис. 2. Геометричні характеристики течії

вання, прийємо: за характерний лінійний розмір L — діаметр основного сопла D , в якості характерної розрахункової швидкості U_0 — початкову швидкість рідини на зрізі сопла, а за характерну об'ємну витрату — витрату рідини Q_1 .

Побудова математичної моделі, система рівнянь руху. Течія, що досліджується, не має єдиного переважаючого напрямку розвитку в усій області її формування, що обумовлює непридатність використання для її моделювання теорії прилежого шару і необхідність використання більш загальних підходів до побудови математичної моделі. Тому в даній частині дослідження використовується найбільш загальний підхід, що базується на системі диференціальних рівнянь в частинних похідних в формі Нав'є–Стокса.

Враховуючи симетричність струменя відносно його осі, використаємо декартову систему координат $ХОУ$, початок якої лежить на осі сопла в перерізі його вихідного зрізу, поздовжня вісь $ОХ$ співпадає з віссю сопла, а вісь $ОУ$ спрямована уздовж радіального напрямку (рис. 1). В цій системі координат рівняння Нав'є–Стокса можуть бути записані наступним чином

$$\frac{\partial y^{\chi} \bar{u}}{\partial \bar{x}} + \frac{\partial y^{\chi} \bar{v}}{\partial \bar{y}} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{1}{y^{\chi}} \left[\frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{t}} + \frac{\partial y^{\chi} \bar{u}^2}{\partial \bar{x}} + \frac{\partial y^{\chi} \bar{u} \bar{v}}{\partial \bar{y}} \right] = \frac{1}{y^{\chi}} \left[\frac{\partial}{\partial \bar{x}} (\Gamma_u \bar{y}^{\chi} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{x}}) + \frac{\partial}{\partial \bar{y}} (\Gamma_u \bar{y}^{\chi} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{y}}) \right] - \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{x}} + S_u, \quad (4)$$

$$\frac{1}{y^{\chi}} \left[\frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{t}} + \frac{\partial y^{\chi} \bar{u}^2 \bar{v}}{\partial \bar{x}} + \frac{\partial y^{\chi} \bar{v}^2}{\partial \bar{y}} \right] = \frac{1}{y^{\chi}} \left[\frac{\partial}{\partial \bar{x}} (\Gamma_v \bar{y}^{\chi} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{x}}) + \frac{\partial}{\partial \bar{y}} (\Gamma_v \bar{y}^{\chi} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{y}}) \right] - \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{y}} + S_v, \quad (5)$$

$$\frac{1}{y^{\chi}} \left[\frac{\partial \bar{c}}{\partial \bar{t}} + \frac{\partial y^{\chi} \bar{u} \bar{c}}{\partial \bar{x}} + \frac{\partial y^{\chi} \bar{v} \bar{c}}{\partial \bar{y}} \right] = \frac{1}{y^{\chi}} \left[\frac{\partial}{\partial \bar{x}} (\Gamma_c \bar{y}^{\chi} \frac{\partial \bar{c}}{\partial \bar{x}}) + \frac{\partial}{\partial \bar{y}} (\Gamma_c \bar{y}^{\chi} \frac{\partial \bar{c}}{\partial \bar{y}}) \right] - \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{y}} + S_c, \quad (6)$$

де рівняння (3) є рівнянням нерозривності, (4), (5) — рівняння руху для поздовжньої u та радіальної v складових швидкості, рівняння (6) описує перенос рідиною концентрації додаткової фази.

Згідно загальноприйнятій практиці, рівняння (3)–(6) подано в безрозміреному вигляді. При безрозмірюванні координат x та y використовується характерний розмір розрахункової області L , в якості якого можна вибрати відстань від сопла до поверхні або, наприклад, діаметр сопла. Таким чином, $\bar{x} = x/L$, $\bar{y} = y/L$. Складові швидкості u і v безрозмірюються за характерною швидкістю, в якості якої можна вибрати швидкість на зрізі сопла, тобто $\bar{u} = u/u_H$, $\bar{v} = v/u_H$. Тиск p безрозмірено наступним чином $\bar{p} = p/(\rho u_H^2)$, де ρ — густина рідини. Час t безрозмірюється згідно виразу $\bar{t} = tu_H/L$. Символами Γ позначено безрозмірені дифузійні коефіцієнти, що обчислюються через кінематичний коефіцієнт ефективної в'язкості $\nu_{\text{eff}} = \nu + \nu_t$ за формулами: $\Gamma_u = \Gamma_v = \frac{\nu_{\text{eff}}}{u_H L}$, $\Gamma_c = \Gamma_u / S_c$, де S_c — молекулярне число Шмідта, значення якого визначається фізично-хімічними властивостями рідкої фази та супутнього газового потоку. В першому наближенні значення може S_c бути покладено сталим. Концентрація рідкої фази c в рівнянні (6) безрозмірюється за значенням в початковому перерізі c_0 , тобто $\bar{c} = c/c_0$. Символами S в рівняннях (4)–(6) позначено джерельні члени, які мусять відтворювати силові особливості міжфазової взаємодії. Їх визначення становить одну з важливих задач моделювання. Показник степеня χ дозволяє використовувати наведену вище систему для моделювання як плоских течій ($\chi = 0$), так і осесиметричних ($\chi = 1$).

Турбулентна в'язкість ν_t , що входить складовою в формулу ефективної в'язкості, мусить визначатися моделлю турбулентності, що пов'язує характеристики збуреного турбулентного руху з параметрами осередненої течії. В якості такої моделі слід обирати диференціальні моделі турбулентності, оскільки для течії, що розглядається, алгебраїчні моделі не придатні, враховуючи на наявність сильного зв'язку між різними зонами, що є складовими даної течії. Цей зв'язок не може бути коректно врахований алгебраїчними моделями турбулентності, які ґрунтуються на концепції виключно локальної взаємодії між збуреною і осередненою складовими турбулентного руху.

Диференціальні ж моделі потребують окремого детального аналізу і адаптації по відношенню до конкретної розрахункової конфігурації. В зв'язку з цим це передбачається зробити на наступному етапі дослідження. На цьому етапі, враховуючи зроблені вище припущення, обмежимо розгляд лише ламінарним режимом формування течії. Для цього покладемо коефіцієнт турбулентної в'язкості рівним нулю, тобто $\nu_t = 0$. Слід зазначити, що зроблене обмеження впливатиме лише на кількісні, а не на якісні характеристики формування течії, тому на етапі формування концепції математичної моделі та розрахункового методу воно цілком придатне.

Система (3)–(6) має еліптичний тип за просторовими координатами, що передбачає постановку граничних умов на усіх межах розрахункової області.



В початковому розрахунковому перерізі:

$$(\bar{x} = 0): \bar{u} = f(\bar{y}), \bar{v} = 0, \bar{c}_0 = \Phi(\bar{y}). \quad (7)$$

На поверхні, нормальній до осі струменя:

$$(\bar{x} = x_s): \bar{u} = 0, \bar{v} = 0, \quad (8)$$

де x_s — відстань від зрізу сопла до поверхні.

На зовнішніх межах логічним є задання умов відсутності зміни параметрів, що розраховуються, або так званих м'яких граничних умов.

Вирази (7), (8) містять неповний перелік очевидних граничних умов. Решта граничних умов обумовлена властивостями рідкої фази (спроможністю змішуватись з рідиною основного потоку, вагомистю, концентрацією тощо). Конкретна реалізація як наведених граничних умов (7), (8), так і додаткових великою мірою залежить від застосованого методу інтегрування та від геометричних особливостей різницевої сітки (у випадку використання скінченно-різницевого чисельного методу розв'язку). Крім того, слід зазначити, що і структура рівняння переносу рідкої фази в газорідному струмені (6) може зазнати деяких змін залежно від особливостей цієї фази.

Функція $\bar{u} = f(\bar{y})$ задає початковий профіль швидкості, її джерелом можуть бути, наприклад, експериментальні дані. Функція $\bar{c}_0 = \Phi(\bar{y})$ визначається відомою концентрацією c_0 фази, що переноситься основним потоком, на зрізі сопла форсунки, а також геометричними характеристиками самої форсунки.

Таким чином, маємо систему з чотирьох взаємозв'язаних диференціальних рівнянь в частинних похідних (3)–(6) разом з граничними умовами (7), (8). Складність цієї системи обумовлена наявністю фази, що переноситься, і складним характером її взаємодії з основною фазою, що не дає змоги отримати розв'язок в аналітичному вигляді. Для однофазної необмеженої плоскопаралельної ламінарної течії, яка натікає на перпендикулярно до неї стінку, такий розв'язок в околі критичної точки є можливим і міститься, наприклад в [4], для осесиметричного та плоского випадків. Така течія дещо схожа до геометрії потоку, що розглядається в даному дослідженні, але аналітичний розв'язок обмежений, по-перше, більш простою геометрією течії, по-друге, однофазним випадком, і нарешті, він справедливий лише в малому околі критичної точки. Узагальнення цього розв'язку на випадок турбулентної течії також не можливе. Наведені міркування обумовлюють необхідність застосування до розв'язування даної задачі чисельних методів інтегрування системи (3)–(6) як більш універсальних, гнучких і адаптованих до зміни геометричних та режимних параметрів, що характеризують потік.

Порівняльний аналіз чисельних методів, що описують рух рідини. Чисельні методи є важливим елементом сучасних технологій моделювання різноманітних течій. Огляди різноманітних чисельних методів розрахунку характеристик в'язких течій та їх застосування до різноманітних роз-

рахункових конфігурацій містяться в роботах [5–10]. Стосовно течій в'язкої рідини поширені два підходи до інтегрування системи рівнянь.

Перший полягає в спрощенні системи рівнянь шляхом переходу до перетворених змінних (функція струму — завихреність). Цей підхід дозволяє виключити з рівнянь одну з невідомих змінних — тиск \bar{p} , тобто зменшити в процесі розв'язування кількість взаємозалежних параметрів на одиницю, що значно спрощує як систему рівнянь, так і розрахунковий метод. Це дозволяє побудувати ефективний метод чисельного розв'язку, але для отримання розподілу тиску слід використовувати додаткове рівняння.

Специфіка змінних, використаних в цьому методі, потребує відповідної технології задання граничних умов, що накладає обмеження на діапазон режимних параметрів течії, в якому цей метод забезпечує можливість побудови збіжного ітераційного процесу відшукування розв'язку. Зокрема, суттєві обмеження накладаються на число Рейнольда Re . При $Re > 1000$ даний метод різко втрачає ефективність, а в деяких випадках стає повністю непрацездатним. Крім того, суттєвим його недоліком є незначна точність відтворення розподілу тиску. Ці обмеження і недоліки примушують відкинути цей підхід стосовно задачі, що є предметом розгляду.

Другий метод інтегрування системи рівнянь руху рідини в оригінальних неперетворених змінних: складові швидкості u, v , а також тиск p . В спеціальній літературі [5–10] клас таких методів розрахунку отримав абревіатуру SIMPLE (Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations — напівявний метод для розв'язування зв'язаних через тиск рівнянь). Цей підхід більш громіздкий з точки зору алгоритмізації і програмування, передбачає використання рознесеної в області розрахунку різницевої сітки для різних розрахункових змінних (так званої шахматної сітки). Крім того, даний метод потребує набагато більших витрат часу і ресурсів комп'ютера порівняльно з першим розглянутим методом. Але ці недоліки цілком покриваються більшою універсальністю цього методу щодо діапазону чисел Re і інших параметрів, що характеризують режим течії. Зокрема, цей метод значно краще пристосований до можливості узагальнення на випадок моделювання турбулентних режимів течій. Крім того, він забезпечує задовільне для практичних потреб передбачення розподілу тиску. Саме ці властивості SIMPLE метода дозволяють обґрунтувати його використання для моделювання течії струменя, що натікає під прямим кутом на тверду поверхню і рекомендувати цей метод в ролі базового для подальших досліджень в напрямку моделювання капілярних методів діагностики стану поверхонь елементів різноманітних конструкцій.

Висновки

Проведений в статті аналіз дозволяє дійти наступних висновків.

1. Контроль несучільностей внутрішніх циліндричних поверхонь конструкцій суттєво відрізняється



від контролю зовнішніх поверхонь впливом вихрових потоків, що протидіють струменю, що направлений до поверхні. Тому необхідно врахувати циркуляцію потоків, яка виникає при обробці і може суттєво зменшувати заповнення несучильностей.

2. Задача вибору оптимальних режимів обробки актуальна і потребує розрахунків конструктивних і технологічних параметрів обладнання для обробки.

3. Наведено принципи побудови інженерного та теоретичного методів розрахунку характеристик газорідних струминних течій, які використовуються для нанесення дефектоскопічної рідини на поверхню з метою дослідження цілісності останньої.

4. Отримані системи співвідношень, що описують взаємодію струминного потоку та поверхні, що є об'єктом діагностики, демонструють, що на ефективність контролю впливають як геометричні особливості поверхні, що досліджується, так і параметри формування струменя.

1. Деклараційний патент України 48406А. Пристрій для нанесення рідких дефектоскопічних матеріалів при капілярній дефектоскопії на поверхню контрольованого

- виробу / А. М. Овсянкін, Г. М. Франчук, В. Я. Дереча, А. В. Попов. Оубл. 15.08.2002. Бюл. № 8.
2. Франчук Г. М., Овсянкін А. М., Попов А. В. Забезпечення контролепридатності елементів шасі з титанових сплавів з підвищеною чутливістю неруйнівного контролю // Вісник НАУ. — 2002. — № 2. — С. 141–145.
3. Пажи Д. Г., Галустов В. С. Основы техники распыливания жидкости. — М.: Химия, 1984. — 256 с.
4. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. — М.: Иниздат, 1956. — 528 с.
5. Белов И. А., Кудрявцев Н. А. Теплоотдача и сопротивление пакетов труб. — Л.: Энергоатомиздат, 1987. — 223 с.
6. Белов И. А., Шеленикевич В. А., Шуб Л. И. Моделирование гидромеханических процессов в технологии изготовления полупроводниковых приборов и микросхем. — Л.: Политехника, 1991. — 287 с.
7. Патанкар М. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / Пер. с англ. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 150 с.
8. Роуч П. Вычислительная гидромеханика / Пер. с англ. — М.: Мир, 1980. — 616 с.
9. Андерсон Д., Танихилл Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен / Пер. с англ. — Т. 2. — М.: Мир, 1990. — 329 с.
10. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей / Пер. с англ. — Т. 2. — М.: Мир, 1991. — 552 с.
11. Овсянкін А. М., Демидко В. Г. Контроль несучильностей цилиндрических поверхностей порожнистых элементов конструкций // Матер. IV Нац. наук.-техн. конф. і виставки «Неразрушающий контроль и техническая диагностика — 2003». — Киев, ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ, 19–23 мая 2003. — С. 354–357.

Рассматриваются проблемы обработки дефектоскопическими жидкими материалами цилиндрических внутренних поверхностей полых конструкций при капиллярном контроле. При нанесении индикаторного пенетранта с помощью форсунок результат заполнения поверхностных несплошностей определяется параметрами струй. Расчетным методом получены уравнения для изменений статического давления и скорости жидкости в струе вблизи стенок цилиндра вследствие перетекания газа в середину факела. Для оценки скорости и концентрации жидкой фазы при взаимодействии с обрабатываемой поверхностью предложен способ построения математической модели на основе системы дифференциальных уравнений в частных производных в форме Навье–Стокса.

При решении уравнений можно выбрать расстояние от среза сопла форсунки до обрабатываемой поверхности или диаметр сопла для обеспечения необходимой скорости встречи струи с поверхностью. Осредненные параметры течения в струе предлагается дополнять дифференциальной моделью турбулентности с решением задачи численными методами интегрирования системы уравнений. Одним из наиболее эффективных численных методов является метод SIMPLE на основе компьютерной программы, который обеспечивает универсальность для максимального числа параметров, характеризующих режимы потока и может быть использован для дальнейших задач моделирования процессов капиллярного контроля внутренних цилиндрических поверхностей.

ОБОСНОВАНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ ДИСБАЛАНСА РОТОРОВ

А. С. ЛОПАТИН, А. М. МАРКОВ, В. А. СМИРНОВ, В. Л. ХРИСТЕНЗЕН

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния дисбаланса на вибрацию газотурбинных установок. Рассмотрена методика выявления дисбаланса роторов методами вибродиагностики с помощью анализа низкочастотных спектров и функции когерентности.

The paper gives the results of theoretical and experimental investigations of the influence of disbalance on vibration of gas-turbine units. A procedure is considered for detection of rotor disbalances by the methods of vibration diagnostics, using analysis of low-frequency spectra and coherence function.

Для обнаружения неисправностей в газотурбинных агрегатах на начальной стадии развития дефекта применяется способ сравнения спектров вибрации реальной турбины с эталонными спектрами. Однако здесь трудности связаны с выбором необходимого числа спектральных составляющих, подлежащих анализу.

Выявление дефектов, возникновение которых обуславливает силовое возбуждение вибрации, осуществляется анализом спектральных составляющих, связанных с частотой вращения ротора.

Основные дефекты, появление которых сопровождается высоким уровнем вибрации (дисбалансы, расцентровки, коробления корпусных деталей и т. д.), связаны с частотой вращения ротора и кратными с ней гармоническими составляющими.

До настоящего времени нет однозначной методики диагностирования и конкретных признаков разделения этих дефектов, так как все они базируются на определении роста первой роторной гармоники. В результате диагностические признаки этих дефектов не соответствуют требованиям однозначности и достаточности. Кратные роторные гармоники также фигурируют почти во всех случаях (почти с одной конфигурацией) и только усложняют постановку точного диагноза. В результате достоверность диагностирования этих как бы давно изученных дефектов по прежнему остается низкой.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили найти закономерности в вибрационных процессах, возбуждаемых при появлении этих дефектов.

Одним из основных признаков этих дефектов является закономерность распределения уровней роторных гармоник.

Теоретически и экспериментально доказаны существование бесконечного ряда кратных роторных гармоник, закон распределения их уровней, который изменяется при возникновении различных дефектов.

Виброперемещения точек корпуса подшипника в любом направлении описываются выражением:

$$X(t) = \sum_{k=1/m}^n A_k \cos(k\omega_p t - \varphi_k), \quad (1)$$

где A_k — амплитуда k -й гармоники; k — порядок гармоники; m, n — целые положительные числа; ω_p — угловая частота вращения ротора.

Наиболее сильная частотная составляющая этого ряда — первая роторная гармоника. Исследования вибрационных процессов в эксплуатационных условиях показали, что интенсивность высших гармоник бездефектного механизма убывает с увеличением номера гармоник по закону, близкому к экспоненциальному. Нарушение экспоненциального закона распределения амплитуд роторных гармоник происходит при появлении и развитии определенных дефектов.

Характер изменения роторной вибрации определяется упруго-массовыми свойствами системы «ротор-опоры-корпус» и степенью демпфирования колебаний, которые в практике всегда нелинейные.

Предполагаем, что нелинейные колебания являются периодической функцией обратной частоты, раскладываемой в ряд Фурье. Тогда амплитуды роторных гармоник являются результатом разложения в ряд Фурье функции, являющейся решением нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих вынужденные колебания системы «ротор-опоры-корпус».

Известно, что если абсолютная величина функции интегрируема на интервале разложения, то коэффициенты Фурье при $k \rightarrow \infty$ стремятся к нулю (теорема Римана-Лебега). Если функция на всем интервале разложения имеет непрерывные производные до $(m-1)$ -го порядка включительно, причем каждая из этих производных на концах интервала имеет одно и то же значение, и если m -я производная кусочно-непрерывна, то коэффициенты Фурье убывают не медленнее, чем k^{-m} . Рассматриваемая в нашем случае функция [1] удовлетворяет перечисленным условиям, и, следовательно, амплитуды роторных гармоник убывают не медленнее, чем k^{-m} , т. е.



$$|A_k| < \frac{C}{k^m}, \quad (2)$$

где C — постоянная.

Аппроксимируем уровни роторных гармоник экспоненциальной функцией в виде:

$$|A_k| = \Phi \exp(-rk\omega_p), \quad k = 1, 2, \dots, \quad (3)$$

где Φ и r — постоянные аппроксимации.

Известное теоретическое распределение вероятности амплитуд вибрации отдельного агрегата, аппроксимируемое моделью «синусоида + шум», описывается законом Райса. При явно выраженных дискретных составляющих спектра распределение амплитуд можно отнести к нормальному. В практике с помощью статистической обработки выявлено распределение вероятности амплитуд вибрации, близкое закону Рэлея. Однако статистические данные экспериментальных исследований парка газотурбинных установок различного типа позволили обнаружить новые закономерности в распределении плотности вероятности амплитуд вибрации [1] по сравнению с известными теоретическими распределениями.

Полученное распределение спектра уровней роторных гармоник (3) позволяет представить модель виброскорости в виде полигармонического дискретного процесса (1). Переходя к эквивалентной комплексной записи, получаем выражение для комплексного общего уровня виброскорости:

$$\bar{V} = \sum_{k=1}^{\infty} \bar{A}_k \exp(+ki\omega_p t), \quad (4)$$

где $\bar{A}_k = A_k \exp(i\phi_k)$ — комплексная амплитуда виброскорости k -й роторной гармоники, характеризующая модулем A_k и фазой ϕ_k колебаний; ω_p — частота вращения ротора; t — время; $i^2 = -1$.

Теоретические и экспериментальные исследования [2] показали, что между комплексными амплитудами виброскорости роторных гармоник спектров, полученных на корпусах подшипниковых опор ГТУ, существует зависимость:

$$\bar{A}_k = \alpha_{k-1} \bar{A}_1^k. \quad (5)$$

Здесь α_{k-1} , $k = 1, 2, \dots$ — коэффициенты пропорциональности [1]; \bar{A}_k — средняя амплитуда виброскорости первой роторной гармоники.

Комплексную амплитуду первой роторной гармоники колебаний корпусов подшипников ротора ТВД представляем линейной функцией параметров дисбаланса [3] с помощью передаточных функций в виде:

$$\bar{A}_1 = \omega^3 \sum_{k=1}^{\infty} Q_k \bar{D}_k, \quad (6)$$

где $\bar{D}_k = D_k \exp(i\phi_k)$ — комплексная амплитуда дисбаланса ротора, харак-

теризуемая модулем D_k и фазой колебания ϕ_k ; Q_k — передаточные функции, вычисление которых производим по [1]; k — число точек ротора, в которых сосредоточен дисбаланс.

Для дисбаланса ротора ТВД предполагаем, что в эксплуатационных условиях весь дисбаланс сосредоточен на ступенях ОК и определяется только установкой лопаток на ступень. Применяя для анализа вибрации ротора ТВД выражение (6), дисбаланс ротора для k -й ступени выразим в виде:

$$\bar{D}_k = \sum_{j=1}^{m_k} \left[\frac{\mu_j L_j}{2} \right]_k \exp\left(-i \frac{2\pi(j-1)}{m_k}\right), \quad (7)$$

где μ_0 , L_j — соответственно масса и длина лопатки; m_k — число лопаток на ступени.

Нормирование общего уровня вибрации позволяет определить наличие и степень развития дефекта в ГТУ, но не вскрывает обуславливающей его причины. Определить конкретный дефект при силовом и кинематическом возбуждении вибрации возможно только при анализе распределения уровней гармонических составляющих спектра вибрации.

Для нормирования амплитуд виброскорости роторных гармоник, распределенных по экспоненте, необходимо учитывать плотности распределения вероятности отдельных гармоник при исследовании партии ГТУ. Выражение для плотности вероятности первой роторной гармоники описывается распределением Рэлея. При $\alpha = \text{const}$ плотность распределения вероятности A_k представим в виде:

$$P(A_k) = P(A_1) \frac{A_1}{k A_k}. \quad (8)$$

Вычисляя моменты m -го порядка, получаем связь моментов k -й и первой роторных гармоник в виде:

$$M(A_k^m) = \alpha^{(k-1)m} M(A_1^{km}). \quad (9)$$

Вводя приближенное соотношение $M^m(A_k^k) \approx M(A_1^{km})$ и вычисляя момент второго порядка, получаем выражение k -й роторной гармоники в виде:

$$\sqrt{M(A_k^2)} \approx \sqrt{2} \sigma(A_k), \quad (10)$$

где $\sigma(A_k)$ — дисперсия k -й роторной гармоники;

$$A_{k \text{ бд}} = \alpha_1 \sqrt{2} \sigma(A_k); \quad A_{k \text{ нр}} = \alpha_1 3\sigma(A_k); \quad (11)$$

$\sigma(A_k)$ — дисперсия k -й гармоники колебаний.

Используя максимальное значение коэффициента $\alpha_1 = 1,86$ и выбирая среднестатистические

Нормы уровней роторных гармоник спектра виброскорости агрегата ГТК-10-4

Параметр	Номер гармоники				
	1	2	3	4	5
Среднее квадратическое отклонение $\sigma(A_k)$, мм/с	1,8	0,75	0,68	0,62	0,57
Нормы бездефектного ГПА $A_{k \text{ бд}}$, мм/с	4,7	1,95	1,76	1,6	1,5
Нормы предельно допустимые $A_{k \text{ нр}}$, мм/с	10,0	6,0	3,8	3,0	2,4

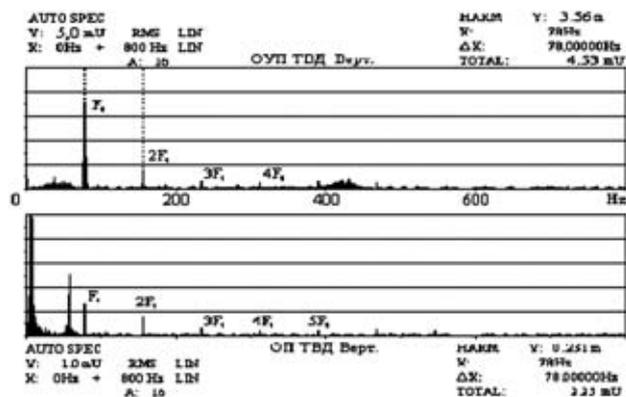


Рис. 1. Спектры вибрации ГТК-10-4 (подшипники ротора ТВД; исходное состояние)

значения роторных гармоник в трех направлениях на корпусах всех подшипников, получим значения $A_{кбд}$ и $A_{кпр}$ для пяти роторных гармоник ГТУ ГТК-10-4 (таблица).

Дисбалансы роторов в эксплуатационных условиях могут значительно превышать допустимые нормы. Это происходит в случае обрыва пера лопатки ОК, турбины или частичной поломки лопатки по высшим модам собственных колебаний, возникновения тепловых дисбалансов, статических прогибов ротора, коробления корпусных деталей и т. д. Закон распределения уровней роторных гармоник при больших значениях дисбаланса роторов ГТУ изучался при проведении специальных экспериментальных исследований.

Исследования вибрационного состояния газовых турбин в эксплуатационных условиях показали, что при возникновении различных дефектов существует зависимость уровней роторных гармоник. Наличие ярко выраженных дискретных гармонических составляющих в спектрах вибрации подтверждает, что вибрационные процессы для всех типов турбин являются полигармоническими, с большим отношением «сигнал-шум». Изменение уровней роторных гармоник в эксплуатационных условиях, безусловно, является диагностическим признаком возникновения дефектов и степени их развития. Выявить закономерности изменения уровней роторных гармоник для каждого конкретного дефекта, а следовательно, повысить достоверность и однозначность диагностического признака возможно только экспериментальными исследованиями с введением каждого дефекта при натурных испытаниях. Несмотря на некоторое удорожание исследований, только этот метод дает наиболее достоверные результаты.

Исследования проводились на агрегате ГТК-10-4, который отработал назначенный ресурс и подлежал демонтажу.

В программу эксперимента входили: исследование вибрационных процессов, возбуждаемых роторами ТВД и ТНД при искусственном введении дисбалансов в плоскости коррекции и на консольных дисках каждого ротора; исследование вибрационных процессов, возбуждаемых при расцентровка роторов ТНД и нагнетателя, дисбалансе соединительной муфты, а также ослаблении пред-

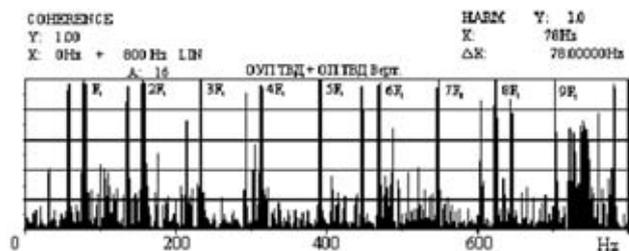


Рис. 2. Спектр функции когерентности, полученный на подшипниках ротора ТВД в вертикальном направлении (исходное состояние)

варительного натяга на вкладышах подшипников скольжения. Для исследования вибрационных процессов двухканальный анализатор 2034 был настроен для получения следующих конфигураций: автоспектры, взаимные спектры, спектры функции когерентности, спектры когерентной выходной мощности, фазовые спектры.

Изменение балансировки роторов ТВД и ТНД проводилось последовательной установкой дополнительных грузов в плоскостях коррекции (балансировочных пазах) роторов. Для каждого значения вводимых дисбалансов проводились исследования вибрационного состояния на трех режимах по оборотам роторов ГТУ. Для численной оценки процессов использовались следующие характеристики: динамический диапазон в автоматическом режиме; частотный диапазон $F_1 = 0 \dots 800$ Гц; разрешающая способность $\Delta F = 1$ Гц; параметр «виброскорость»; индикация уровней дискретных составляющих и общего уровня вибрации.

Исходное состояние экспериментальных исследований дисбаланса роторов соответствовало допустимому остаточному дисбалансу ТВД: по 1-й плоскости коррекции $D_{ост} = 154$ г·см, по консольному диску — $D_{ост} = 86$ г·см.

Автоспектры, полученные на корпусах подшипников, представляют собой дискретные эквидистантные спектры со случайными узкополосными процессами и акустическим шумом (рис. 1). Остаточный дисбаланс в районе опорно-упорного подшипника (ОУП) ротора ТВД превышает остаточный дисбаланс ротора в районе опорного подшипника (ОП). Величина виброскорости первой роторной гармоники в спектре, полученном на

ОУП, больше и составляет $\dot{X} = 3,56$ мм/с. В спектрах вибрации на обоих подшипниках присутствуют кратные роторные гармоники, величина которых убывает с ростом номера гармоники.

В спектре, полученном на ОУП ТВД, присутствуют два широкополосных случайных процесса с центральными частотами 38 и 424 Гц. В спектре на ОП ТВД — два узкополосных процесса с частотами 15 и 58,5 Гц, уровни которых превышают уровни роторных гармоник. Частота $f_2 = 58,5$ Гц соответствует частоте вращения ротора ТНД. Экспоненциальный закон распределения уровней роторных гармоник сохранился. В видимой части спектра виброскорости присутствуют кратные гармонические составляющие во всем измеряемом диапазоне частот. В спектре функции когерентности

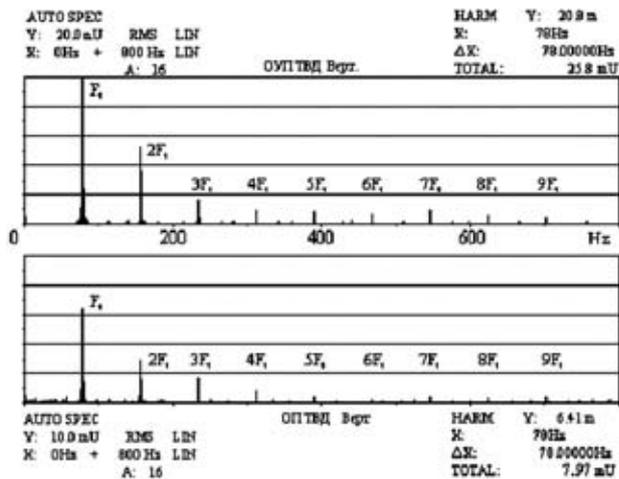


Рис. 3. Спектры виброскорости, полученные на ОУП и ОП ТВД ($P = 137$ г)

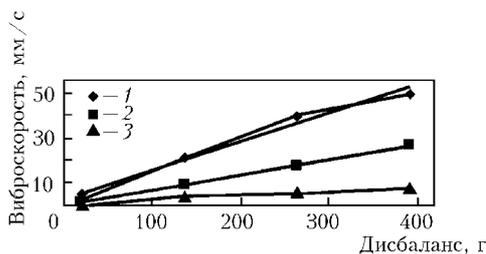


Рис. 4. Зависимость роста амплитуды виброскорости роторных гармоник от дисбаланса ротора ТВД в первой плоскости коррекции: 1 — 1-я; 2 — 2-я; 3 — 3-я гармоники

(рис. 2), полученном с двух акселерометров обоих подшипников ротора ТВД в вертикальном направлении, все роторные гармоники имеют значение $\gamma^2 \approx 1$, что подтверждает присутствие кратных гармонических составляющих в вибрационном процессе, возбуждаемом остаточным дисбалансом ротора. Высокий уровень частотных составляющих в спектре функции когерентности свидетельствует о взаимосвязанных колебательных процессах на обоих подшипниках ротора и о том, что эти процессы возбуждаются именно этой деталью ГТУ, т. е. ротором ТВД. Все частотные составляющие с уровнем $\gamma^2 < 0,9$ возбуждаются другими деталями и передаются на подшипники ТВД по корпусам или по валопроводу ГТУ.

Для увеличения дисбаланса в плоскости коррекции устанавливались последовательно грузы массой $P = 137, 264, 390$ г соответственно. Уровни виброскорости первой роторной гармоники и кратных к ней частотных составляющих резко возрастали (рис. 3).

Случайные узкополосные процессы и акустический шум ввиду увеличения динамического диапазона измерения остаются за кадром и визуально не различимы. Дальнейшее увеличение дисбаланса приводит к продолжению роста гармонических составляющих спектра виброскорости — практически без изменения закона убывания кратных роторных гармоник. Зависимость увеличения виб-

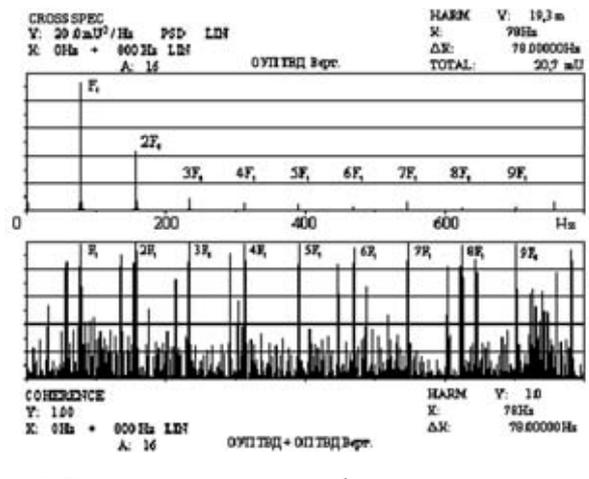


Рис. 5. Взаимный спектр и спектр функции когерентности, полученные на подшипниках ротора ТВД (дисбаланс $P = 137$ г)

роскорости от дисбаланса по всем гармоникам близка к линейной (рис. 4). Взаимный спектр и спектр функции когерентности, полученные с акселерометров, установленных на двух опорах ротора ТВД в одном направлении, подтверждают наличие кратных роторных гармоник в вибрационном процессе, вызванном дисбалансом ротора (рис. 5). Высокий уровень частотных составляющих спектра функции когерентности ($\gamma^2 \approx 1,0$) характеризует не только взаимосвязь колебательных процессов, но и тот факт, что эти процессы возбуждаются только данной деталью, т. е. ротором ТВД.

Закономерность распределения уровней роторных гармоник сохраняется при дисбалансах, вводимых во вторую плоскость коррекции (ОП ТВД) и на диск турбины — как в плоскости коррекции, так и на лопатках.

Выводы

Теоретическими исследованиями и статистической обработкой экспериментальных данных подтверждается, что для бездефектного ГТУ уровни роторных гармоник убывают по экспоненциальному закону. Учитывая неизбежность остаточного дисбаланса в бездефектном ГТУ и сохранение закона убывания роторных гармоник с увеличением дисбаланса до предельно допустимых значений (по уровню $V_{пр}$), можно утверждать, что диагностическим признаком дисбаланса ротора ГТУ является пропорциональный рост роторных гармоник. При этом экспоненциальный закон распределения уровней роторных гармоник сохраняется.

1. Бесклетный М. Е., Игуменцев Е. А. Вибрационная диагностика дисбаланса ротора газотурбинной установки ГТ-750-6. — М.: Энергомашиностроение, 1980. — № 4. — С. 27–29.
2. Вибрационный контроль технического состояния газотурбинных газоперекачивающих агрегатов / Ю. Н. Васильев, М. Е. Бесклетный, Е. А. Игуменцев и др. — М.: Недра, 1987. — 198 с.
3. Лобанов В. К. Применение статистических методов при назначении исходных дисбалансов роторов // Динамика гибких роторов. — М.: Наука, 1972. — С. 74–77.

НАКЛОННЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ И АНАЛИЗ ИХ РАБОТЫ

В. Е. ЧАБАНОВ, В. И. ГОРДЕЛИЙ

Представлена теория ЭМА-преобразователей, генерирующих SV-поляризованные акустические сигналы, выполненная с максимально возможным учетом всех влияющих на их работу факторов. Приведены результаты численного и физического экспериментов, позволяющих сконструировать наклонные ЭМА-преобразователи, надежно работающие под углами 35 и 65°.

The paper sets forth the theory of EMA-transducers, which generate SV-polarized acoustic signals, constructed with maximum possible allowance of all the factors, influencing their operation. Results are given of numerical and physical experiments, which allow designing angle-beam transducers, operating reliably at angles of 35 and 65°.

Необходимость разработки надежного электромагнитно-акустического (ЭМА) преобразователя обусловлена, в основном, тем, что традиционный УЗ-контроль на основе пьезопреобразователей не позволяет осуществлять контроль изделий бесконтактно, в условиях высоких температур, затруднен при дефектоскопии движущихся изделий и проч. И это обстоятельство ограничивает сферу экономически оправданного и достоверного контроля с помощью ультразвука, затрудняет применение его при поточном производстве, препятствует автоматизации. ЭМА-преобразователи дают возможность во многом разрешить указанные проблемы, однако их чувствительность, помехоустойчивость, избирательность сигналов, особенно при наклонном контроле, в подавляющей части существующих конструкций оставляют желать лучшего.

Это объясняется, в первую очередь, недостаточной проработкой теории. В самом деле, параметров, от которых зависит работа ЭМА-преобразователей, оказывается очень много и корреляция их друг с другом настолько велика, что экспериментальная оптимизация конструкции преобразователей становится весьма непростой и дорогостоящей. Некоторые знания не могут быть получены с помощью эксперимента, а поэтому создание хорошо работающих ЭМА-преобразователей в большей мере зависит от таланта и искусства разработчиков, чем от экспериментального или аналитического анализа.

Теоретические исследования работы ЭМА-преобразователей осуществлялись многими авторами, и прежде всего Г. А. Буденковым, Ю. М. Шкарлетом, В. Т. Бобровым, Ю. В. Волеговым, С. Н. Шуваевым, А. В. Малинкой, О. В. Неволиным и многими другими [1–4]. Вместе с тем некоторые важные особенности их работы до настоящего времени остаются не выявленными. Так, не установлено воздействие на характеристики возбуждаемого звука экранов, их параметров, различных конструктивных зазоров, неизбежных при изготовлении преобразователей. Открытыми являются вопросы влияния формы импульсных сигналов на характеристики генерируемых акустических волн,

особенности работы наклонных преобразователей и т. д.

В настоящей статье делается попытка ликвидировать отмеченные пробелы. В ней развиваются некоторые положения, описанные авторами в ранних работах, и сделан упор на преобразователи, работающие под наклонными углами (рис. 1). Здесь 1 — среда, в которой располагается катушка преобразователя (в настоящей задаче — воздух); 2 — контролируемая среда; 3 — воздушная среда над катушкой; 4 — отражающий экран, расположенный перед магнитопроводом 5.

Соответствующие размеры в направлении y также показаны на рисунке. Так, a_4 — размер отражающего электромагнитные волны экрана или заменяющего его магнитопровода; в продольном направлении x — размер работающей части катушки для всех элементов преобразователя (он принимался одинаковым для всех элементов преобразователя и равным L).

Потенциал магнитного поля в изучаемых средах будем находить, используя следующие волновые уравнения:

$$(\Delta + k_{1z}^2)A_{1x} = -\mu_0 j_x, \quad (\Delta + k_{jz}^2)A_{jx} = 0, \quad j \neq 1, \quad (1)$$

где Δ — лапласиан; k_j — волновое число электромагнитных волн, равное

$$k_j^2 = \omega \mu_j^* (\omega \epsilon_j^* - i \sigma_j) = \frac{\omega \mu_j}{c_0^2} \left(\omega \epsilon_j - \frac{i \sigma_j}{\epsilon_0} \right);$$

c_0 — скорость света в вакууме, $c_0^2 = (\epsilon_0 \mu_0)^{-1}$, ω — круговая частота.

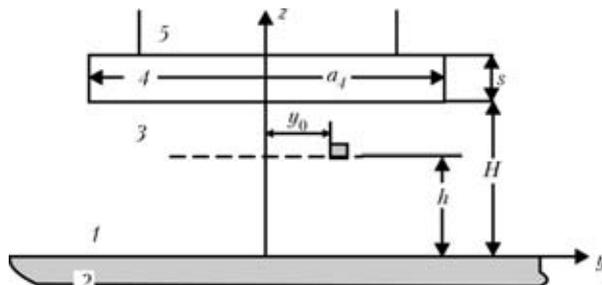


Рис. 1. Рабочая схема ЭМА-преобразователей

Временная зависимость электромагнитной волны представлена в виде $\exp(-i\omega t)$; ϵ_j и μ_j — соответственно диэлектрическая и магнитная проницаемости сред; σ_j — их удельные электропроводности; $\mu_j^* = \mu_j \mu_0$; $\epsilon_j^* = \epsilon_j \epsilon_0$; $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6}$ Гн/м; $\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; \vec{A}_j^* — векторный потенциал индукции \vec{B} переменного магнитного поля, вызываемого одним проводником в j -м слое преобразователя; $\vec{B} = \text{rot} \vec{A}^*$; \vec{j}_j^* — плотность электрического тока в проводнике. В дальнейшем индекс x будем опускать.

Принимая во внимание, что по сравнению с конструктивными параметрами преобразователя в направлении z длина токопроводов сравнительно большая величина, решение будем строить в двухмерной форме. Далее, при переходе к изучению акустических процессов от этого условия откажемся. Для решения соответствующего неоднородного дифференциального уравнения воспользуемся преобразованием Фурье. В результате для трансформанты Фурье указанного потенциала имеем

$$A^0 = \frac{\mu_0 J_0}{(\beta^2 + \gamma^2 - k_{1z}^2)} e^{-i(\beta y_0 + \gamma h)}.$$

Выполнив обратное преобразование, получим:

$$A^0 = \frac{\mu_0 J_0}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \exp[i\beta(y - y_0)] d\beta \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{i\gamma(z - h)}}{(\beta^2 + \gamma^2 - k_{1z}^2)} d\gamma = D \int_{-\infty}^{\infty} \exp[-q_1 |z - h|] \exp[i\beta(y - y_0)] \frac{d\beta}{q_1}, \quad (2)$$

где $q_j = \sqrt{\beta^2 - k_{jz}^2}$; $q_2 = \sqrt{\beta^2 - k_2^2}$; $D = \frac{\mu_0 J_0}{2}$.

Тогда волны, отраженные от контролируемого тела A_2 и от экрана A_4 , а также прошедшие во внутрь них Ψ_2 и Ψ_4 , найдем в виде:

$$A_2 = D \int_{-\infty}^{\infty} R_2 \exp[-q_1(z + h)] \exp[i\beta(y - y_0)] \frac{d\beta}{q_1},$$

$$A_4 = D \int_{-\infty}^{\infty} R_4 \exp[-q_1(2H - h - z)] \exp[i\beta(y - y_0)] \frac{d\beta}{q_1},$$

$$\Psi_2 = D \int_{-\infty}^{\infty} N_2 \exp[q_2 z] \exp[-q_1 h] \exp[i\beta(y - y_0)] \frac{d\beta}{q_2},$$

$$\Psi_4 = D \int_{-\infty}^{\infty} N_4 \exp[-q_4(z - H)] \times$$

$$\times \exp[-q_1(H - h)] \exp[i\beta(y - y_0)] \frac{d\beta}{q_4}.$$

Неизвестные коэффициенты отражения R_j и прохождения N_j находим из следующих граничных условий:

$$\text{при } z = 0 \quad A^0 - A_2 + A_4 W = \Psi_2,$$

$$\frac{1}{\mu_1} \frac{\partial(A^0 - A_2 + A_4 W)}{\partial z} = \frac{1}{\mu_2} \frac{\partial \Psi_2}{\partial z};$$

при $z = H$ и $-a_4/2 - y_0 < y \leq a_4/2 - y_0$ A_0 должно выполняться $W + A_2 - A_4 W = \Psi_4$,

$$\frac{1}{\mu_1} \frac{\partial(A^0 W + A_2 - A_4 W)}{\partial z} = \frac{1}{\mu_4} \frac{\partial \Psi_4}{\partial z}$$

(для других значений y указанные условия не выполняются). Здесь $W = \frac{e^{i\beta y_0 \sin(\beta a_4/2)}}{\beta a_4/2}$. Откуда получаем:

$$\Psi_2 = D \int_{-\infty}^{\infty} \exp[-q_2 z] \exp[i\beta(y - y_0)] d\beta, \quad (3)$$

где

$$\Psi^0 = \frac{\exp[q_1(H - h)](Q_1 + Q_4) + Q_1(\exp[q_1 h] + W \exp[-q_1 h])(Q_2 + Q_4) + \dots + W \exp[-q_1(H - h)](Q_1 - Q_4)}{(\exp[q_1 h] - W \exp[-q_1 h])(Q_1^2 + Q_2 Q_4)}. \quad (4)$$

На электроны в металлах, находящиеся под действием переменного магнитного поля, действуют силы Лоренца, вызывающие появление токов Фуко I_Φ . Их взаимодействие с полем постоянного магнита индукцией B_0 ведет к появлению силы Ампера, передаваемой ионной решетке металлов, которая описывается уравнением:

$$\vec{F} = I_\Phi [\Delta \vec{T} \times \vec{B}_0],$$

где $\Delta \vec{T}$ — длина проводника с током. В случае исследуемых ЭМА-преобразователей с катушкой возбуждения указанная длина устанавливается шириной постоянного магнита, под которым проходят провода катушки, и для настоящей задачи принимаем ее равной L . Будем считать $I_\Phi = j_\Phi \Delta S$, т. е. сила тока Фуко равна плотности указанного тока j_Φ в сечении проводника площадью ΔS , перпендикулярном направлению токов. Тогда $\vec{F} = j_\Phi \Delta S [\Delta \vec{T} \times \vec{B}_0]$, или $\vec{f} = \vec{F} / \Delta V = [j_\Phi \vec{e} \times \vec{B}_0]$ — механическая сила, действующая на единицу объема вещества проводником с током, помещенным в постоянное магнитное поле.

Воспользуемся законом Ома в дифференциальной форме $\vec{j}_\Phi = \sigma \vec{E}$, где σ — удельная проводимость вещества; \vec{E} — напряженность электрического поля, создаваемого проводником. В результате находим

$$\vec{f} = \sigma [\vec{E} \times \vec{B}_0].$$

Из уравнений Максвелла имеем:

$$\text{rot} \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t = -\partial(\text{rot} \vec{\Psi}_2) / \partial t = -\text{rot}(\partial \vec{\Psi}_2 / \partial t),$$

где функция Ψ_2 описывается выражениями (3) и (4). Откуда для исследуемой силы в материале контроля находим:

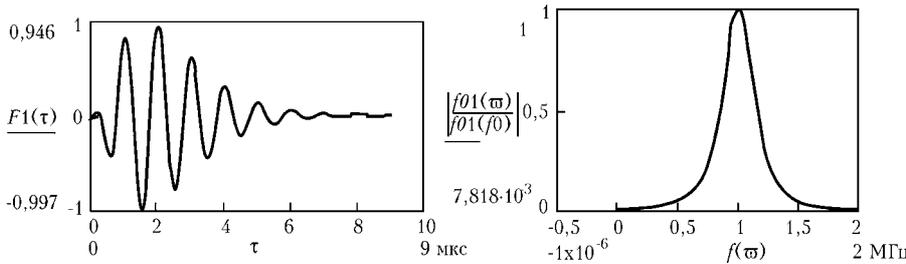


Рис. 2. Временная и спектральная характеристики электрических сигналов при $\gamma = 2$, $\eta = 0,2\omega_0$

$$\vec{f} \approx -\sigma_2 \frac{\partial}{\partial t} [\vec{\Psi}_2 \times \vec{B}_0] = -\sigma_2 \left[\frac{\partial \vec{\Psi}_2}{\partial t} \times \vec{B}_0 \right].$$

Здесь полагается, что \vec{B}_0 — постоянная величина, по крайней мере по сравнению со всеми другими переменными задачи. Направление вектора $\vec{\Psi}_2$ в настоящем случае перпендикулярно \vec{B}_0 , а сам сигнал считается монохроматическим $I = I_0 e^{-i\omega t}$. В результате получаем следующее решение для силы, действующей со стороны постоянного магнита и проводника с током при показанной на рис. 2 схеме решения задачи:

$$f_y = i\omega B_0 \sigma_2 \Psi_2. \quad (5)$$

Здесь и далее индукция постоянного магнитного поля B_0 полагается большой настолько, что она достигает предела насыщения совместного тракта магнитопровода и объекта контроля и поэтому слабо зависит от величины зазора. Кроме того, большая величина B_0 гарантирует незначительное воздействие магнитострикции на величину получаемых акустических полей.

Сила f_y служит источником продольных и поперечных волн в изделии, скалярный Φ и векторный $\vec{\Pi}$ потенциалы смещения \vec{U} частиц, среды которых описываются следующими дифференциальными уравнениями [5]:

$$\vec{U} = \text{grad } \Phi + \text{rot } \vec{\Pi}, \quad (\Delta + k^2)\Phi = -\frac{1}{c^2} Q,$$

$$(\Delta + k^2)\vec{\Pi} = -\frac{1}{c_t^2} \vec{N},$$

где c и c_t — скорости продольных и поперечных волн в контролируемом изделии; k и k_t — их волновые числа; Q и \vec{N} — скалярная и векторная составляющие источника объемных сил; ρ — плотность материала контроля. Причем, $-\frac{1}{\rho} \text{div } \vec{f} \approx \Delta Q$; $\frac{1}{\rho} \text{rot } \vec{f} \approx \Delta \vec{N}$. В результате находим:

$$(\Delta + k^2)\Phi = -\frac{1}{\rho\omega^2} \text{div } \vec{f}; \quad (\Delta + k_t^2)\vec{\Pi} = -\frac{1}{\rho\omega^2} \text{rot } \vec{f}$$

Для вычисления искомых потенциалов воспользуемся функциями Грина [5]. В результате имеем:

$$\Phi(\vec{R}) = \frac{1}{4\pi c^2} \int_V \frac{Q(\vec{r})}{|\vec{R} - \vec{r}|} \exp[ik|\vec{R} - \vec{r}|] dV(\vec{r}),$$

где координаты \vec{R} относятся к точке наблюдения; \vec{r} — источника.

Тогда, принимая во внимание, что функция Грина может быть представлена в виде набора плоских волн [5] как

$$\frac{\exp[ik(R-r)]}{(R-r)} = \frac{i}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp[-q(Z-z)] \times \\ \times \exp[i\{\alpha(X-x) + \beta(Y-y)\}] d\alpha d\beta,$$

после выполнения всех требуемых преобразований, получаем:

$$\Phi^0 = \frac{D_1 L}{\rho\omega^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \text{Sinc}(L) \Psi^0(\beta) \times \\ \times \frac{\beta}{q_2} \left[\frac{\exp[-qz]}{q(q_2 - q)} + \frac{2\exp[-q_2 z]}{q^2 - q_2^2} \right] \times \\ \times \exp[i\{\alpha x + \beta(y - y_0)\}] d\alpha d\beta,$$

$$\Pi^0 = \frac{i\sqrt{2\pi} D_1 L}{\rho\omega^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \text{Sinc}(L) \Psi^0(\beta) \times \\ \times \left[\frac{\exp[-q_t z]}{q_t(q_2 - q_t)} + \frac{2\exp[-q_2 z]}{q_t^2 - q_2^2} \right] \times \\ \times \exp[i\{\alpha x + \beta(y - y_0)\}] d\alpha d\beta,$$

где

$$q = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2 - k^2}; \quad \text{Sinc}(L) = \frac{\sin(\alpha L/2)}{\alpha L/2},$$

$$q_t = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2 - k_t^2}; \quad q_{1t} = \sqrt{\beta^2 - k_{1z}^2}, \quad q_{2t} = \sqrt{\beta^2 - k_2^2},$$

$$D_1 = \frac{\mu_0 \omega I_0 B_0 \sigma_2}{2}.$$

Тогда полное решение для акустического поля в среде найдем в следующем виде:

$$\Phi = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left[A \exp[-qz] + D_2 \frac{\beta}{q_2} \left(\frac{\exp[-qz]}{q(q_2 - q)} + \frac{2\exp[-q_2 z]}{q^2 - q_2^2} \right) \right] \times \\ \times \exp[i\{\alpha x + \beta(y - y_0)\}] d\alpha d\beta,$$

$$\Pi = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left[E \exp[-q_t z] + iD_2 \left(\frac{\exp[-q_t z]}{q_t(q_2 - q_t)} + \frac{2\exp[-q_2 z]}{q_t^2 - q_2^2} \right) \right] \times \\ \times \exp[i\{\alpha x + \beta(y - y_0)\}] d\alpha d\beta, \quad D_2 = \frac{\sqrt{2\pi} D_1 \text{Sinc}(L) \Psi^0(\beta)}{\rho\omega^2}.$$

Неизвестные A и E определим из следующих условий на границе контролируемой среды, по-

лучаемых с помощью известного уравнения Навье–Стокса [5]:

$$\sigma_{zz} = \lambda \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \Phi + 2\mu \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} - 2\mu \frac{\partial^2 \Pi_x}{\partial y \partial z} = 0,$$

$$\frac{\sigma_{yz}}{\mu} = 2 \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y \partial z} + \frac{\partial^2 \Pi_x}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 \Pi_x}{\partial y^2} = 0.$$

Здесь σ_{zz} , σ_{yz} — продольная и поперечная составляющие тензора напряжения в твердом теле; γ и μ — объемный и сдвиговой параметры Ламе среды.

Для исследования представляет интерес только значение векторного потенциала акустической волны, поскольку амплитуды продольных волн, излучаемые исследуемым источником и описываемые скалярным потенциалом, пренебрежимо малы. Принимая во внимание, что волновые значения расстояний, на которых исследуются характеристики волн, обычно больше длины волны, для вычисления полученных интегралов можно воспользоваться методом стацифазы для кратных интегралов. Тогда, переходя к сферической системе координат и полагая, что $x = R \sin \theta \sin \varphi$, $y = R \sin \theta \cos \varphi$ и $z = R \cos \theta$, для показателя экспоненты получаем:

$$iR\Theta(\alpha, \beta) = iR \times$$

$$\times \left[\alpha \sin \theta \sin \varphi + \beta \sin \theta \cos \varphi + \sqrt{k_t^2 - \alpha^2 - \beta^2} \cos \theta \right].$$

В таком случае для нахождения координаты точки стацифазы необходимо решить следующую систему уравнений:

$$\frac{\partial \Theta(\alpha, \beta)}{\partial \alpha} = \sin \theta \sin \varphi - \frac{\alpha \cos \theta}{\sqrt{k_t^2 - \alpha^2 - \beta^2}} = 0,$$

$$\frac{\partial \Theta(\alpha, \beta)}{\partial \beta} = \sin \theta \cos \varphi - \frac{\beta \cos \theta}{\sqrt{k_t^2 - \alpha^2 - \beta^2}} = 0.$$

Если вторые слагаемые перенести в правые части уравнений и разделить их одно на другое, то тогда получаем $\alpha = \beta \operatorname{tg} \varphi$, а подставляя данное равенство в первое из данных уравнений, получаем: $\alpha_0 = k_t \sin \theta \sin \varphi$, $\beta_0 = k_t \sin \theta \cos \varphi$.

В результате, подставив данные значения и выполнив все требуемые преобразования и переходя к напряжениям, создаваемым акустической волной, находим:

$$\sigma_{R\theta}(\omega) \approx -\mu \frac{\partial^2 \Phi}{\partial R^2} = D_3 \frac{\operatorname{Sinc}^0(L) \Psi_0(\theta, \varphi)}{k_t R Z^0(\theta, \varphi)} \times$$

$$\times [(\sin^2 \theta \cos^2 \varphi F_2^0 - F_3^0)(q^{02} - 0,5 + p^{-2}) +$$

$$+ 2 \sin^2 \theta \cos^2 \varphi F_1^0 q^0] \exp[-i\omega t_t]. \quad (6)$$

В данном решении используются следующие значения параметров:

$$q_j^0 = \sqrt{\sin^2 \theta - n_j^{-2}}; \quad q^0 = \sqrt{\sin^2 \theta - p^{-2}}; \quad q_t^0 = i \cos \theta;$$

$$p = c/c_t; \quad n_j = k_t/k_j; \quad D_3 = \frac{(2\pi)^{3/2}}{4} c_t \cos \theta \mu_0 I_0 B_0 \sigma_2;$$

$$\operatorname{Sinc}(L) = \frac{\sin(k_t L \sin \theta \sin \varphi / 2)}{k_t L \sin \theta \sin \varphi / 2}; \quad Q_j^0 = \frac{q_j^0}{\mu_j};$$

$$F_1^0 = \frac{1}{q_2^0} \left[\frac{0,5 - p^{-2}}{q^0(q_2^0 - q^0)} + \frac{(p^2 - 2)n_2^{-2}}{q^{02} - q_2^{02}} - \frac{q_0}{q_2^0 - q^0} - \frac{2q_2^{02}}{q^{02} - q_2^{02}} \right] +$$

$$+ \frac{1}{q_2^0 - q_t^0} + \frac{2q_2^0}{q_t^{02} - q_2^{02}};$$

$$F_2^0 = \frac{2}{q_2^0} \left(\frac{1}{q_2^0 - q^0} + \frac{2q_2^0}{q^{02} - q_2^{02}} \right) - \frac{1}{q_t^0(q_2^0 - q_t^0)} - \frac{2}{q_t^{02} - q_2^{02}};$$

$$F_3^0 = \frac{q_t^0}{q_2^0 - q_t^0} + \frac{2q_2^{02}}{q_t^{02} - q_2^{02}};$$

$$Z^0(\theta, \varphi) = (q_t^{02} + \sin^2 \theta \cos^2 \varphi)(q^{02} - 0,5 + p^{-2}) -$$

$$- 2 \sin^2 \theta \cos^2 \varphi q^0 q_t^0, \quad t_t = t - \frac{R}{c_2},$$

t — текущее время.

Полученным решением можно пользоваться для изучения поперечных волн, излучаемых ЭМА-преобразователями при монохроматическом их возбуждении. Представляет интерес установить, как они меняются при переходе к обычно применяемым импульсным сигналам. Одну из употребительных форм можно описать следующим выражением:

$$F(\tau) = \tau^\gamma \exp[-\eta \tau] \cos(\omega_0 \tau) (e\eta/\gamma),$$

где $\omega_0 = 2\pi f_0$, f_0 — рабочая частота. Параметры γ и η описывают скорости изменения нарастающей и убывающей частей импульсного сигнала. Так, для монохроматического сигнала они равны нулю, в случае коротких дельта-импульсных сигналов — стремятся к бесконечности. Заметим, что функция $F(t)$ является практически нормированной.

Спектральная плотность указанного сигнала устанавливается следующим выражением:

$$f^*(\omega) = \frac{1}{2\sqrt{2\pi}} (e\eta/\gamma)^\gamma \Gamma(\gamma + 1) \times$$

$$\times \left\{ \frac{1}{[\eta + i(\omega_0 - \omega)]^{\gamma+1}} + \frac{1}{[\eta - i(\omega_0 + \omega)]^{\gamma+1}} \right\}, \quad (7)$$

в котором $\Gamma(\gamma + 1)$ — гамма-функция соответствующего аргумента. В случае целых γ данная функция имеет два полюса: $\omega_{1,2} = \pm \omega_0 - i\eta$; при нецелых γ указанными координатами описываются точки ветвления на комплексных ω . Анализ последних связан с существенными трудностями, поэтому ограничимся только целочисленными значениями γ .

На рис. 2 показаны временные и спектральные значения указанных функций. Выполненный анализ подтвердил, что наиболее близкими к реаль-

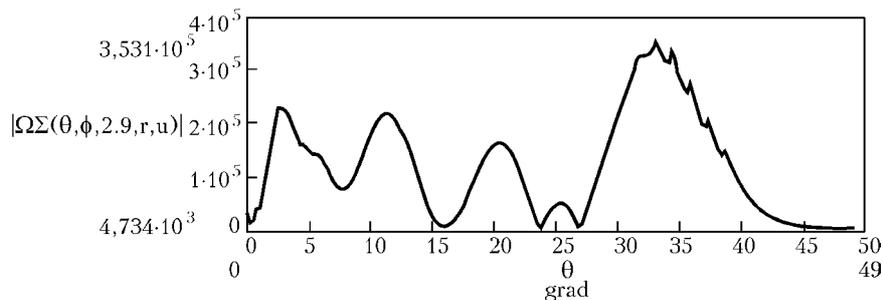


Рис. 3. Диаграмма излучения типового ЭМА-преобразователя, предназначенного для работы под углом 34,1°

ному сигналу являются импульсы, описываемые параметрами γ и η .

Для таких сигналов искомое значение сдвиговой составляющей поперечной волны, возбуждаемой ЭМА-преобразователем, принимает следующий вид:

$$\sigma_{R\theta}(t) = \frac{-D_3 \cos \theta}{2RZ^0(\theta, \varphi)} \left(\frac{e\eta}{\gamma} \right)^\gamma \times \left\{ \frac{\partial^2}{\partial \omega^2} (A(\omega) \exp[-i\omega t]) \Big|_{\omega = \omega_0 - i\eta} + \frac{\partial^2}{\partial \omega^2} (A(\omega) \exp[-i\omega t]) \Big|_{\omega = -\omega_0 - i\eta} \right\}, \quad (8)$$

где

$$A(\omega) = \frac{\text{Sinc}^0(L)\psi_0(\theta, \varphi)}{k_t} \times [(\sin^2 \theta \cos^2 \varphi F_2^0 - F_3^0) + 2 \sin^2 \theta \cos^2 \varphi F_1^0 q^0].$$

Данное решение является искомым и описывает временную составляющую акустического напряжения, создаваемого ЭМА-преобразователями в твердых телах. Заметим, что оно оказывается достаточно надежным, поскольку никакие допущения,

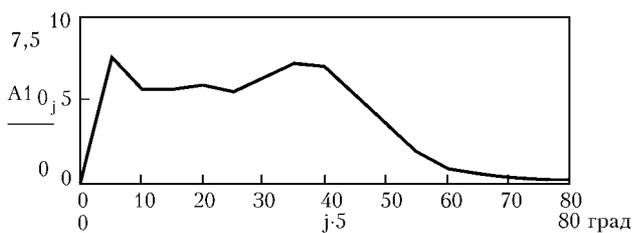


Рис. 4. Экспериментально измеренная и статистически обработанная диаграмма направленности излучения ЭМА-преобразователя, предназначенного для работы под углом 34,1°

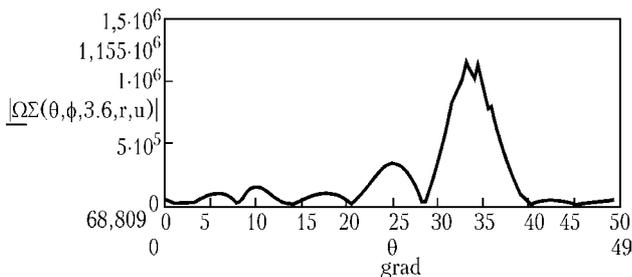


Рис. 5. Расчетная диаграмма направленности излучения оптимизированного ЭМА-преобразователя

кроме указанных в начальных условиях, здесь не применялись и имеющиеся интегралы вычислялись строго.

На рис. 3 и 4 приведены расчетная и экспериментально измеренная характеристики обычного применяемого сейчас ЭМА-преобразователя, предназначенного для работы на частоте 1 МГц при величине зазора, равного 1 мм.

Нетрудно видеть, что расчет достаточно неплохо коррелирует с экспериментом. Кроме того, применение таких преобразователей для реального контроля затруднено, поскольку его диаграмма направленности столь широка, что затрудняет не только локализацию дефектов, но и высокий уровень акустических помех, обусловленных приходом паразитных сигналов не только со стороны рабочего угла, но и всех других.

В этой связи, пользуясь имеющимся математическим аппаратом, появилась возможность спроектировать ЭМА-преобразователь со сравнительно узкой диаграммой направленности. Его расчетные и экспериментальные характеристики показаны на рис. 5 и 6.

Здесь результаты расчета и эксперимента качественно совпадают, а несколько более широкая направленность реального преобразователя объясняется некоторым отклонением ширины токопроводов катушки от принятой в расчете.

Применение разработанного математического аппарата позволяет спроектировать ЭМА-преобразователь, способный при возбуждении на различных частотах работать как под малыми, так и под большими углами излучения и приема. В частности, для того же преобразователя и угла, примерно равного 65°, имеем расчетную и экспериментальную характеристики, показанные на рис. 7, 8.

Нетрудно видеть, что заметное отклонение расчетной характеристики от экспериментальной наблюдается только на угле 35°. В причине его следует еще разобраться. В то же время с помощью разработанного математического аппарата удалось спроектировать ЭМА-преобразователь, устойчиво работающий на больших углах. И это обстоятельство раскрывает дополнительные возможности таких устройств для неразрушающего контроля материалов.

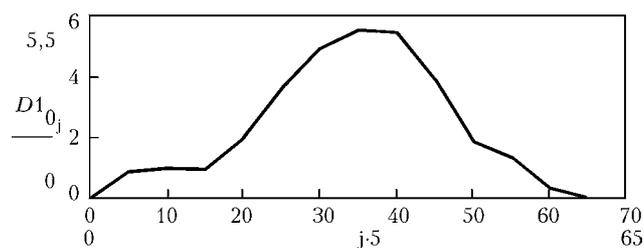


Рис. 6. Экспериментально измеренная и статистически обработанная характеристика направленности излучения оптимизированного ЭМА-преобразователя

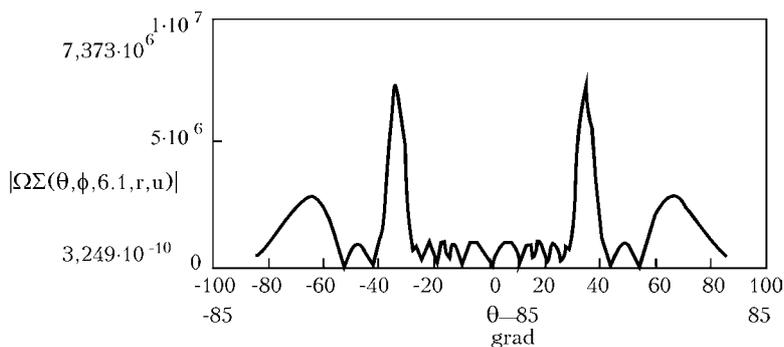


Рис. 7. Расчетная характеристика оптимизированного ЭМА-преобразователя при его работе на другой частоте

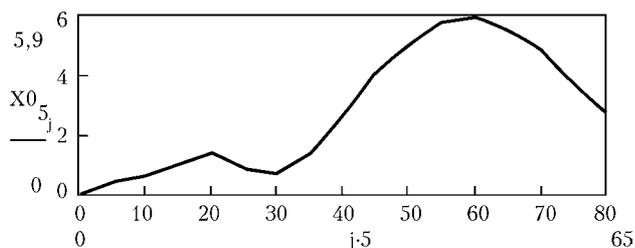


Рис. 8. Экспериментальная характеристика оптимизированного ЭМА-преобразователя при его работе на другой частоте

Выводы

В результате выполненного теоретического исследования удалось создать математический аппарат, позволяющий путем манипулирования многих параметров, в том числе характеристиками катушки, магнитопровода, экранов и величиной всех зазоров,

формы применяемых электрических импульсных сигналов сконструировать ЭМА-преобразователи, обладающие заданными качествами. Направлять их излучение под нужными углами, получать наклонные преобразователи, генерирующие акустические сигналы как в одном, так и в двух направлениях и т. д. Очевидно, что без наличия теоретического аппарата получить такие результаты было бы невозможно.

1. Буденков Г. А., Гуревич С. Ю. — Дефектоскопия, 1981. — № 5. — С. 5–33.
2. Шкарлет Ю. М. Бесконтактные методы ультразвукового контроля. — М: Информрибор, 1974. — 57 с.
3. Dobbs R. Phys. Acoustics. V.10. Ch.3. Academic Press. New York and London, 1073.
4. Комаров В. А. Квазистационарное ЭМА-преобразование в металлах / Свердловск, УНЦ АН СССР, 1986.
5. Чабанов В. Е. Лазерный ультразвуковой контроль материалов. — Л.: МГУ, 1986. — 231 с.

НПП «Вигор»,
Москва

Поступила в редакцию
26.03.2004



Международная научно-техническая конференция и выставка «СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА И ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ»

Белорусско-Российский университет
г. Могилев, Республика Беларусь, 20–22 октября 2004 г.

ОРГАНИЗАТОРЫ

Министерство образования Республики Беларусь; Министерство образования Российской Федерации; Национальная Академия Наук Беларуси; Институт прикладной физики НАНБ; Белорусская ассоциация неразрушающего контроля и технической диагностики; Российское общество по неразрушающему контролю и технической диагностике; Белорусско-Российский университет

ОСНОВНАЯ ТЕМАТИКА

1. Дефектоскопия материалов и промышленных изделий (теория и практика).
2. Контроль физико-механических характеристик материалов и изделий.
3. Контроль геометрических параметров объектов.
4. Неразрушающий контроль и диагностика в нефтехимии, энергетике и транспорте.
5. Неразрушающий контроль и диагностика в строительстве.
6. Компьютерные технологии в неразрушающем контроле.
7. Экологическая диагностика.
8. Общие вопросы неразрушающего контроля и технической диагностики.
9. Специальная секция по подготовке кадров, посвященная 20-летию кафедры «Физические методы контроля».

АДРЕС ОРГКОМИТЕТА

Белорусско-Российский университет, пр-т Мира, 43, оргкомитет
212005, г. Могилев, Республика Беларусь

Тел.: (+375) 222 225 212; 222 2365 422; факс: 375 222 225 821; e-mail: sss.bru@tuf.by

ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ ХИМИЧЕСКИЙ СЕНСОР НА ОСНОВЕ БРОМТИМОЛОВОГО СИНЕГО ИНДИКАТОРА ДЛЯ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ КОНЦЕНТРАЦИИ АММИАКА

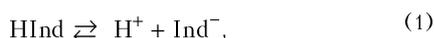
В. Н. ГРЕБЕННИКОВ, П. А. МАНОРИК, А. В. ШУЛЬЖЕНКО, Н. А. СИДОРОВА

Предложен простой по конструкции и в изготовлении твердотельный химический сенсор на основе бромтимолового синего индикатора, работа которого основана на регистрации образования основной формы индикатора как продукта обратимой гетерогенной реакции с участием аммиака. Показана возможность использования такого сенсора в качестве первичных преобразователей оптических измерителей концентраций аммиака и величин его утечек, которые работают в режиме отражения монохроматического света.

A simple in design and fabrication solid-state chemical sensor is proposed, which is based on bromthymol blue indicator, the operation of which is based on recording the formation of the main form of the indicator as a product of a reversible heterogeneous reaction with ammonia participation. A possibility is shown of using such a sensor as the initial sensor in optical instruments for measuring ammonia concentrations and leakage, operating in the mode of monochromatic light reflection.

Аммиак все более широко применяют как охлаждающий агент для промышленных холодильных установок, систем терморегулирования летательных аппаратов [1, 2] и т. д. Это актуализирует совершенствование известных и создание новых высокочувствительных и в то же время простых, недорогих методов и средств обнаружения и количественной оценки утечек аммиака.

Для локального определения мест утечек этого анализа в течеискании на сегодня используют разнообразные композиции на основе кислотно-основных индикаторов [3–6], большинство которых являются слабыми кислотами. В таких увлажненных композициях, содержащих по меньшей мере один кислотно-основный индикатор, протекает следующая равновесная реакция [7]:



где HInd, Ind⁻ — соответственно кислотная и основная формы индикатора, каждой из которых свойственна своя окраска.

При контакте композиций со сквозными дефектами, через которые проникает аммиак, кислотно-основное равновесие (1) смещается в сторону образования основной формы индикатора вследствие протекания еще одной равновесной реакции:



При этом окраска композиций в местах дефектов при установившемся значении, зависящем от величины утечки аммиака, определяется отношением концентраций основной и кислотной форм индикатора:

$$\lg \frac{[\text{Ind}^-]}{[\text{HInd}]} = \text{pH} - \text{pK}_{\text{Ind}}, \quad (3)$$

где pK_{Ind} — отрицательный логарифм константы кислотной диссоциации индикатора,

$K_{\text{Ind}} = \frac{[\text{H}^+][\text{Ind}^-]}{[\text{HInd}]}$, притом, что $[\text{H}^+]$, $[\text{Ind}^-]$ и $[\text{HInd}]$ — равновесные концентрации ионов водорода, основной и кислотной форм индикатора соответственно.

Величины утечек аммиака оценивают визуально по размерам и интенсивности окраски пятен, которые образуются на поверхности слоя композиции, нанесенного на стенку испытываемого на герметичность изделия, через фиксированные промежутки времени от начала испытаний. Точность количественной оценки утечек аммиака по такому принципу невелика, так как зависит от таких индивидуальных свойств наблюдателя, как острота зрения, способность различать цвета, а также от опыта.

Данная работа посвящена разработке высокочувствительного к аммиаку твердотельного химического сенсора на основе кислотно-основного индикатора, работа которого основана на регистрации образования основной формы индикатора как продукта обратимой гетерогенной реакции с участием аммиака, и оценке возможностей использования такого сенсора в качестве первичного преобразователя оптических измерителей концентрации аммиака, работающих в режиме отражения монохроматического света.

При выборе качественного состава твердотельного химического сенсора на аммиак и методов его изготовления мы руководствовались следующими требованиями:

во-первых, окраска поверхности сенсора при адсорбции и полной десорбции аммиака должна изменяться контрастно и обратимо;

во-вторых, интенсивность окраски поверхности сенсора в присутствии аммиака должна изменяться (хотя бы в узких пределах) пропорционально его концентрации в реакционной зоне;

в-третьих, влияние температуры на метрологические характеристики сенсора должно быть сведено к минимуму;

в-четвертых, такой сенсор, используемый как первичный преобразователь, должен иметь меха-



ническую прочность, достаточную для многократного его использования без разрушения.

С учетом первых трех требований в качестве активного компонента, отвечающего за изменение окраски поверхности сенсора в присутствии аммиака, был выбран бромтимоловый синий индикатор (квалификация «х. ч.»), который используют для колориметрического определения рН водных растворов [7]. Интервал контрастного перехода окраски этого индикатора находится в пределах от рН = 6,0 (желтая окраска кислотной формы) до рН = 7,6 (синяя окраска основной формы). Максимум поглощения синей окраски наблюдается при волновом числе $\nu = 16000 \text{ см}^{-1}$ (длине волны 620 нм), причем интенсивность максимума полосы поглощения при этой длине волны возрастает пропорционально смещению значения рН в щелочную область. Как и для большинства кислых индикаторов, принадлежащих к группе сульфоталеинов, константа кислотной диссоциации бромтимолового синего индикатора ($pK_{\text{Ind}} \approx 7,1$) относительно мало изменяется с температурой вплоть до 100 °С. Поэтому на интервал перехода окраски индикатора изменение температуры влияет также незначительно. Как один из наиболее простых, доступных и дешевых методов для изготовления образцов твердотельных сенсоров было использовано сухое прессование. Для получения таким методом относительно прочных образцов сенсоров, удовлетворяющих четвертому условию, в их состав помимо индикатора были включены наполнитель и армирующий компонент. В качестве наполнителя, выполняющего одновременно и функцию разбавителя индикатора, были опробованы высокодисперсная аморфная окись кремния (аэросил) марки А-300, дисперсная аморфная окись кремния с удельной поверхностью 50 м²/г (белая сажа) и барий сернокислый (квалификация «х. ч.») в количествах от 89,00 до 89,75 мас. %. В качестве армирующего компонента — порошки полиамида, поливинилхлорида, пентапласта и фторопласта в количестве 10 мас. %. Выбор таких наполнителей обусловлен тем, что все они практически нерастворимы в воде, инертны по отношению к индикатору, имеют белую окраску и легко поддаются прессованию. Выбор армирующих компонентов обусловлен их высокой химической стойкостью, относительно высокой гидрофобностью и способностью сохранять форму в процессе прессования при небольших давлениях.

Для оценки чувствительности спрессованных образцов сенсора к аммиаку был применен прямой спектрофотометрический анализ спектров диффузного отражения неоднородных твердых непрозрачных образцов [8], в основе которого лежит функция Кубелки–Мунка, связывающая коэффициент диффузного отражения для таких образцов с концентрацией в них окрашенного продукта химической реакции.

Как известно [9], на основании этого метод анализа о количестве аналита, участвующего в процессах адсорбции–десорбции, можно судить по характерным изменениям на спектрах в определенных диапазонах длин волн. Наибольшей чув-

ствительности и точности количественной оценки можно достичь, проводя измерения по дифференциальной схеме, т. е. сравнивая коэффициент отражения света для исследуемого образца с коэффициентом отражения для рассеивающего объекта, выбранного в качестве белого стандарта.

Поэтому в качестве белого стандарта в работе был использован тот наполнитель, который содержался в исследуемом образце сенсора. С целью исключения искажения спектров диффузного отражения вследствие зеркального отражения [8], связанного с влиянием на результаты конечных измерений размеров зерен исследуемого образца и белого стандарта, наполнитель перед прессованием измельчали в диспергаторе до размера частиц от 2,5 до 4,5 мкм. Для устранения различий в размерах зерен на поверхностях сравниваемых образцов сенсора и белого стандарта для их изготовления использовали наполнитель одного и того же помола.

Сухие однородные смеси компонентов сенсора (индикатор, наполнитель и армирующая добавка) прессовали на гидравлическом прессе марки КЗФ при давлении 100 кгс/см², используя пресс-форму марки РW20 (ГДР). В результате получали достаточно прочные образцы сенсоров диаметром 10 мм и высотой 2 мм. Прессуя таким же образом только наполнитель, получали образцы белого стандарта.

Для сравнения чувствительности использовали результаты спектрофотометрического анализа образцов сенсора разного качественного, но одинакового количественного состава, полученные при одних и тех же концентрациях аммиака. Спектры диффузного отражения для образцов сенсора при различных концентрациях аммиака и спектры для образцов белого стандарта в отсутствие аммиака записывали на спектрофотометре SPECORD M40 (Карл Цейсс, Йена, ГДР), используя двухлучевую схему регистрации. Для этого были специально сконструированы герметичные ячейки проточного и непроточного типов, свободный объем полости каждой из которых при наличии в ней соответственно сенсора или образца стандарта, равнялся 5 см³. Ячейки закрепляли в держателе проб фотометрической приставки спектрофотометра. Каждая из ячеек в верхней части имела окно из кварцевого стекла, что позволяло подводить к поверхности исследуемого образца сенсора и к поверхности образца стандарта падающий свет и отводить отраженный свет, не нарушая оптических условий измерений, предусмотренных инструкцией по эксплуатации спектрофотометра. Конструкция проточной ячейки, предназначенной для размещения исследуемого образца сенсора, предусматривала возможность вводить в ее полость аммиачновоздушную смесь, не прекращая записи спектра. При необходимости полость этой ячейки перед каждым очередным измерением продували сухим чистым воздухом из баллона.

Мерой чувствительности образцов сенсора к аммиаку служило относительное диффузное отражение ($R\%$), т. е. отношение коэффициента отражения для образца сенсора к коэффициенту отражения для белого стандарта, полученные при одном и том же значении волнового числа.

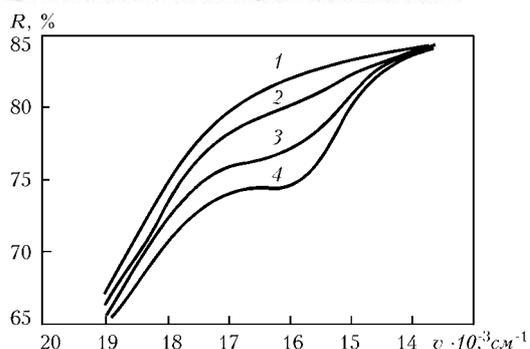


Рис. 1. Спектры диффузного отражения от поверхности твердотельного химического сенсора состава (индикатор): (барий серноокислый): (фторопласт) = 0,5:89,5:10,0 при различных концентрациях аммиака в реакционной зоне, полученные при температуре 298 К и относительной влажности 38 %: 1 — в отсутствие аммиака; 2 — при исходной концентрации аммиака 0,02 мг/л; 3 — 0,04 мг/л; 4 — 0,08 мг/л

Чистый аммиак для экспериментов получали нагреванием колбы со смесью гидроксида калия с хлоридом аммония (оба реактива имели квалификацию «х. ч.»). Для удаления из выделяющегося аммиака побочного продукта реакции — водяных паров — его пропускали через колонку, заполненную молекулярными ситами типа «4А». Осушенным аммиаком заполняли стеклянный узкогорлый сосуд емкостью 25,0 л, после чего сосуд герметично закрывали резиновой пробкой. Концентрацию аммиака в сосуде определяли титрованием по известной методике [7]. Пробу аммиака для анализа отбирали из сосуда шприцем емкостью 20 см³, прокалывая иглой резиновую пробку.

По результатам титрования концентрация аммиака в сосуде составила $1,42 \pm 0,02$ мг/л. Для приготовления калиброванных газовых смесей с меньшим содержанием аммиака из сосуда шприцем отбирали расчетное количество аналита, после чего содержимое шприца разбавляли сухим чистым воздухом из баллона. При спектрофотометрических измерениях полученные калиброванные газовые смеси вводили в реакционную зону (полость проточной ячейки) шприцем. Содержимое шприца выдвигали в ячейку полностью, что гарантировало замену предыдущей калиброванной смеси новой.

Предварительные исследования чувствительности к аммиаку различных образцов сенсора показали, что наиболее оптимальной рецептурой сенсора является та, которая кроме индикатора содержит барий серноокислый и порошок фторопласта марки Ф30П. Поэтому все дальнейшие исследования были выполнены на образцах сенсора такого качественного состава.

Как показали результаты спектрофотометрических измерений образцов сенсора выбранного состава, независимо от соотношения в нем ингредиентов, характерные изменения в спектрах диффузного отражения при адсорбции аммиака поверхностями образцов наблюдаются в диапазоне частот волн 12000... 20000 см⁻¹. В пределах этого диапазона наибольшие изменения коэффициента диффузного отражения для таких образцов сенсоров в присутствии аммиака имеют место при значении волнового числа $\nu = 16000$ см⁻¹. Таким

образом, несмотря на разбавление индикатора наполнителем и связующим, значение эффективного волнового числа для выбранного качественного состава сенсора практически совпадает с его значением для чистого индикатора.

На рис. 1 представлены серии спектров диффузного отражения в виде зависимостей R% от ν , полученных для образцов сенсора состава (индикатор): (барий серноокислый): (фторопласт) = 0,5:89,5:10,0 при разных концентрациях аммиака в реакционной зоне. На этом рисунке спектр 1 диффузного отражения соответствует состоянию поверхности сенсора в отсутствие аммиака, спектр 4 — состоянию поверхности сенсора при концентрации аммиака 0,08 мг/л, спектры 3 и 2 отражают регистрируемую спектрофотометром реакцию поверхности сенсора на концентрации аммиака в полости проточной ячейки 0,04 и 0,02 мг/л соответственно.

Видно, что в присутствии аммиака на поверхности сенсора образуется основная форма индикатора, обуславливающая изменение окраски сенсора: с увеличением концентрации аммиака в реакционной зоне значение коэффициента диффузного отражения для этого сенсора уменьшается, что свидетельствует об увеличении концентрации основной формы индикатора на поверхности сенсора. Указанный процесс обратим: при уменьшении концентрации аммиака значение коэффициента диффузного отражения увеличивается; при продувке проточной ячейки чистым воздухом первоначальная окраска поверхности сенсора полностью восстанавливается.

Полагая, что концентрация основной формы индикатора на поверхности сенсора пропорциональна концентрации аммиака в реакционной зоне, для построения зависимости, связывающей изменение окраски поверхности сенсора с изменением концентрации аммиака C_{NH_3} в реакционной зоне, была использована функция Кубелки–Мунка $F(R)$, которая в соответствии с общей теорией диффузного отражения связывает коэффициент диффузного отражения образца с концентрацией C окрашенного продукта в нем следующим соотношением [8]:

$$F(R) = \frac{(1 - T)^2}{2T} = kC, \quad (4)$$

где $T = R/R_{max}$; (5)

k — коэффициент пропорциональности, учитывающий коэффициент рассеяния для поверхности данного образца сенсора и коэффициент экстинкции окрашенного продукта в образце [8]; R_{max} — максимальное значение параметра R , которое экспериментально определяется из спектров отражения при эффективном значении волнового числа, соответствующем наибольшему приращению этого параметра в присутствии аналита.

Для снижения относительной погрешности измерений, вызванной разбавлением индикатора в сенсоре технологическими компонентами и разбросом среднего размера зерен на его поверхности, была оценена погрешность в определении функции $F(R)$ для образцов сенсора приведенного выше состава.

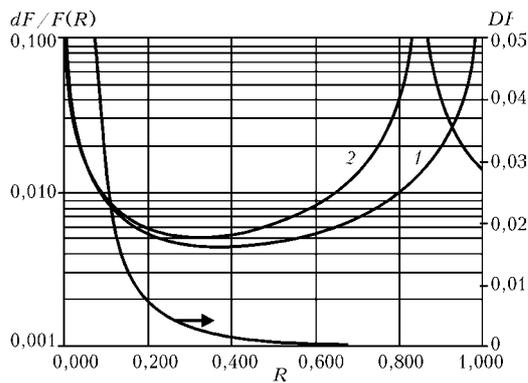


Рис. 2. Зависимости относительной и абсолютной ошибок функции $F(R)$ от величины измеряемого параметра R для твердотельного химического сенсора: кривая 1 — теоретическая зависимость для сенсора при значении $R_{\max} = 1,000$; кривая 2 — для сенсора состава (индикатор):(барий серноокислый):(фторопласт) = 0,5:89,5:10,0 при значении $R_{\max} = 0,847$

Относительная ошибка измерений для функции $F(R)$ была рассчитана на основании закона распространения ошибок [10] с учетом абсолютной погрешности спектрофотометра. После соответствующих преобразований и дифференцирования уравнений (4) и (5) было получено следующее выражение:

$$\frac{\Delta F(R)}{F(R)} = \sqrt{2 \left(\frac{1 + R/R_{\max}}{1 - R/R_{\max}} \right)^2 \left[\left(\frac{\Delta R}{R} \right)^2 + \left(\frac{\Delta R_{\max}}{R_{\max}} \right)^2 \right]} \quad (6)$$

Эта зависимость в общем виде отражает влияние отношения R/R_{\max} на относительную ошибку измерения функции (4).

На основании зависимости (6) было изучено влияние величины измеряемого параметра на относительную и абсолютную ошибки измерения функции $F(R)$ твердотельного сенсора для значений $R_{\max} = 1,000$ (теоретически максимально возможное значение) и $R_{\max} = 0,847$ (экспериментальное значение, полученное для сенсора приведенного выше состава) при $\Delta R_{\max} = \Delta R$ (рис. 2). Как видно из этого рисунка, минимальная величина относительной ошибки при определении функции $F(R)$ достигается при значении $R = 0,367R_{\max}$. По мере уменьшения значения R_{\max} относительная и абсолютная ошибки существенно возрастают.

Графическая зависимость функции $F(R)$ от концентрации аммиака C_{NH_3} в реакционной зоне для твердотельного химического сенсора состава (индикатор):(барий серноокислый):(фторопласт) = 0,5:89,5:10,0 представлена на рис. 3. Этот график наглядно свидетельствует о том, что интенсивность окраски поверхности сенсора, регистрируемая спектрофотометром в диапазоне концентраций аммиака 0,01... 0,20 мг/л, линейно зависит от содержания этого аналита в реакционной зоне в соответствии с уравнением (4). Эта зависимость может быть использована для количественного определения концентрации аммиака. Из рис. 3 также видно, что спектрофотометр вполне

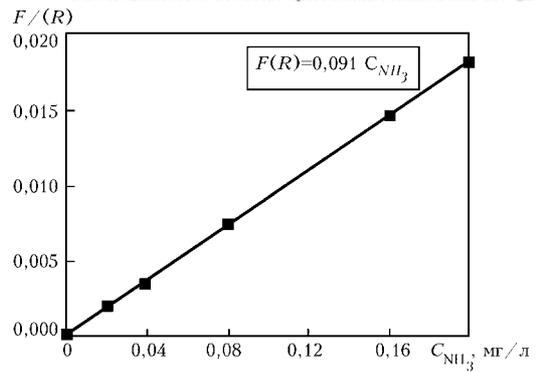


Рис. 3. Концентрационная зависимость $F(R) = f(C_{\text{NH}_3})$ для твердотельного химического сенсора состава (индикатор):(барий серноокислый):(фторопласт) = 0,5:89,5:10,0 при температуре 298 К и относительной влажности 38 %

достоверно регистрирует изменения, происходящие на поверхности образца сенсора, уже при концентрации аммиака в реакционной зоне около 0,02 мг/л.

Таким образом, с учетом высокой чувствительности и полной обратимости разработанный сенсор на аммиак может быть рекомендован в качестве первичного преобразователя оптических измерителей низких концентраций аммиака, а следовательно, и оптических измерителей величин утечек аммиака, работающих в режиме отражения монохроматического света. В сочетании же со спектрофотометром такой сенсор может быть использован для калибровки аммиачных потоков, создаваемых контрольными течами [11].

1. *Технология сборки и испытаний космических аппаратов* / Под общ. ред. И. Т. Белякова, И.А. Зернова. — М.: Машиностроение, 1990. — 352 с.
2. *Савін Ф.П., Джур І. О., Кучма Л. Д., Найденов В. А.* Герметичність у ракетно-космічній техніці // Дніпропетровськ: Вид-во Дніпропетров. держ. ун-ту, 1995. — 168 с.
3. *Запушнін А. И., Фельдман Л. С., Роголь В. Ф.* Контроль герметичности конструкций // Киев: Техніка, 1976. — 152 с.
4. *О современном состоянии и перспективах развития химических методов контроля герметичности* / А. В. Шульженко, Л. И. Бударин, Р. В. Сучкова, А. И. Телятник, Н. Н. Межуев // Диагностика и прогнозирование разрушения сварных конструкций. — 1988. — Вып. 6. — С. 73-79.
5. *Химические методы контроля герметичности сварных изделий* / Л. И. Бударин, Р. В. Сучкова, З. А. Гаврилова, Ю. Н. Посыпайко // Автомат. сварка. — 1984. — № 3. — С. 19-23.
6. *Бударин Л. И., Касаев К. С., Наумов В. Н.* Химические методы испытания изделий на герметичность. — Киев: Наук. думка, 1991. — 208 с.
7. *Индикаторы* / Под ред. Э. Бишоп. Т. 1. — М.: Мир, 1976. — 496 с.
8. *Кортюм Г., Браун В., Герцог Г.* Принципы и методика измерений в спектроскопии диффузного отражения // Успехи физ. наук. — 1965. — 85, № 2. — С. 365-380.
9. *Sellen W., Czolk R., Reichert J., Ache H. J.* Development of an optical — chemical sensor for the detection of ammonium ions // Anal. Chim. Acta. — 1992. — 269, Iss. 1. — P. 83-88.
10. *Доерфель К.* Статистика в аналитической химии / Под ред. В. В. Налимова. — М.: Мир, 1969. — 248 с.
11. *Шульженко А. В.* Контрольные калиброванные течи / Химические методы испытаний изделий на герметичность // Л. И. Бударин, К. С. Касаев, В. Н. Наумов. — Киев: Наук. думка, 1991. — С. 16-21.



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОЗЛОВОГО КРАНА ПОСЛЕ РЕКОНСТРУКЦИИ И МОНТАЖА

В. А. КОВАЛЕНКО, В. А. ДУДНИК, Ж. И. КОВАЛЕНКО

Полученные расчетные данные позволяют определить необходимые и достаточные величины взаимных перемещений тележек и регулировок колес для исправления допущенных при монтаже отклонений и обеспечения прямолинейного движения крана.

Obtained design data allow determination of the necessary and sufficient values of relative displacement of the carriages and wheel adjustment to eliminate deviations introduced during mounting and to ensure rectilinear motion of the crane.

Проблема поддержания эксплуатационной надежности подъемно-транспортных машин за пределами нормативных сроков службы решается в государственном масштабе: проводится активная работа по внедрению современных методов и средств измерений, обсуждаются различные методики и подходы при оценке технического состояния, ведется поиск путей гармонизации нормативной базы стран-производителей подъемно-транспортного оборудования. Известно, что практически все отечественное и зарубежное подъемно-транспортное оборудование (вероятность безотказной работы которого в течение смены в различные периоды эксплуатации составляет 0,8... 0,98) относится к системам с последовательным соединением элементов, т. е. не имеющим резервирования. Отказ любого элемента приводит к отказу всей системы и к непредсказуемости ущерба от аварии — как материального, так и психологического [1]. Особенно наглядно это можно продемонстрировать на оборудовании предприятий топливно-энергетического комплекса (ТЭК).

Недавние резонансные аварии кранов в Украине и России подтверждают необходимость особого подхода при их монтаже, демонтаже и эксплуатации [2, 3]. Поэтому задача, поставленная перед «Научно-координационным межведомственным советом по вопросам безопасности эксплуатации конструкций и сооружений в Украине, которые имеют стратегическое значение для экономики и безопасности страны» [4] — *определение остаточного ресурса сооружений, отработавших нормативный срок эксплуатации и находящихся в эксплуатации с измененными с течением времени механическими свойствами материалов и накопившимися в значительном количестве повреждениями и обеспечением взаимодействия различных организаций и ведомств в деле обеспечения безопасности остается актуальной до сих пор.*

В сложившейся ситуации выбор и приобретение нового оборудования взамен выведенного из эксплуатации (по причине аварий или в связи с отработкой нормативного срока и невозможностью дальнейшего использования) требует не только значительных финансовых ресурсов, но и сопря-

жено с решением ряда сложных инженерных задач, а именно:

привязка приобретенного оборудования к существующей рабочей зоне;

выбор монтажной площадки;

в условиях отсутствия нормативной базы, упорядочивающей работы при замене кранового оборудования (при монтаже не выполняются многие регламентные процедуры — технические, организационные и производственные);

обеспечить технически достижимый, экономически и социально обоснованный минимально допустимый риск при последующей эксплуатации.

Неквалифицированное решение перечисленных проблем приводит к возникновению новых, зачастую более сложных проблем.

Наглядно это можно проиллюстрировать на известном примере: угон ветром козлового крана КК30-27 с эстакады дымососного отделения блоков 300 МВт Змиевской ТЭС в 2002 г. поставил перед предприятием задачу замены разрушенного крана. Следует отметить, что кран накануне был подвергнут модернизации — над одной из жестких опор был установлен поворотный оголовок для обслуживания фильтров.

После монтажа козлового крана КСК-32 была отмечена неудовлетворительная работа механизма передвижения даже без установки поворотного оголовка, что не позволяло использовать кран для выполнения технологических операций.

Проанализировав техническое состояние крана с учетом нормативных документов [5–7], все факторы, оказывающие влияние на неудовлетворительную работу механизма передвижения крана, были разделены на две группы: причинные и следственные.

Первая группа связана с организационно-техническими мероприятиями, которые должны учитывать специфику реализуемого проекта и составляли понятие «модернизация»:

отсутствие альбома карт на демонтаж крана, который недопустимо производить просто «в порядке, обратном монтажу». Это связано с тем, что наибольшие нагрузки, приводящие к появлению дефектов, возникают именно в окончательной

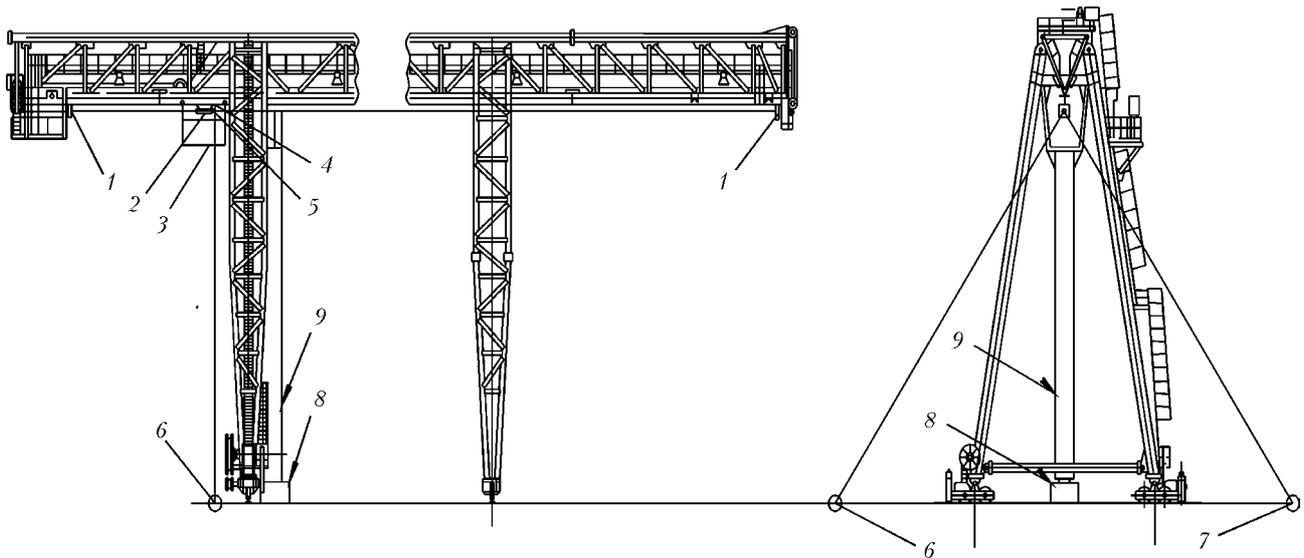


Рис. 1. Один из вариантов измерения геометрических параметров крана

фазе работ и при транспортировке к месту монтажа [8];

отсутствие проекта на подготовку существующих подкрановых путей к установке крана КСК-32, где должны были быть отражены изменения условий работы пары «ходовое колесо–подкрановый рельс» (силовые и кинематические) [9], вызванные заменой четырехопорного крана краном восьмиопорным с балансируемыми тележками;

в Проекте производства работ по монтажу не учтены требования ГОСТ 27584–88 «Краны мостовые и козловые электрические. Общие технические условия», которые не были включены в паспорт крана (дубликат) и инструкцию завода изготовителя по монтажу и эксплуатации крана.

Неудовлетворительную проработку организационно-технических мероприятий дополнило соответствующее проведение монтажных работ, выразившееся, в первую очередь, в невыполнении требований инструкции по монтажу и эксплуатации крана.

В инструкции предусмотрена операция соединения опоры крана со столиком (во время монтажа), которая осуществляется на болтах. Болты затягиваются таким образом, чтобы столик мог смещаться относительно опоры. Для этого в подошве опоры и столике отверстия выполнены большего диаметра, а под гайки и головки болтов подкладываются шайбы.

После установки крана в проектное положение за счет смещения столика ходовая тележка устанавливается так, чтобы середина дорожки катания ходовых колес совпала с осью рельса. Допускаемое смещение 3,0 мм. Только после этого столик приваривается к подошве опоры.

Для фиксации базы крана ($B = 10440$ мм) инструкция предусматривает на стяжке между опорами сварное соединение, которое производят также после установки крана в проектное положение.

Не было выполнено условие контрольной сборки крана на монтажном участке пути, проведение испытаний и приемки крана (так называемая «ста-

пельная сборка») с последующей проверкой геодезическими инструментами [10].

Следствием перечисленных факторов явилось нарушение геометрических параметров крана, что, в конечном итоге, уже на первом этапе работ по монтажу базовой конструкции привело к неудовлетворительной работе ходовой части крана.

В сложившейся ситуации расчитать и установить «весомость» каждой из составляющих геометрических параметров смонтированного крана.

Известные методики [11] определения геометрических параметров объектов такого класса не могут быть рекомендованы и использованы для применения вследствие специфических начальных условий:

предварительно напряженное состояние металлоконструкции крана вследствие «заневоливания» одной опоры при монтаже на существующий подкрановый путь;

изменение конструкции опоры вследствие мероприятий, направленных на усиление опоры со стороны кабины под поворотный оголовок;

отсутствие прямого доступа к контрольным точкам и реализации высокой точности измерений, определенной ГОСТ 27584–88 и предусматривающим реализацию требований в благоприятных условиях (до монтажа конструкции).

Выверка (определение установки ходовых колес в вертикальной и горизонтальной плоскостях) и определение диагоналей пролетного строения смонтированного крана представляют сложную и трудоемкую задачу, так как на всем протяжении подкранового пути отсутствует возможность осуществления прямых измерений параметров крана между опорами с уровня подкранового рельса.

Наиболее рациональная технология процесса съемки геометрических параметров крана при одновременном обеспечении требуемой точности получаемых результатов и безопасности работ предполагает (рис. 1):

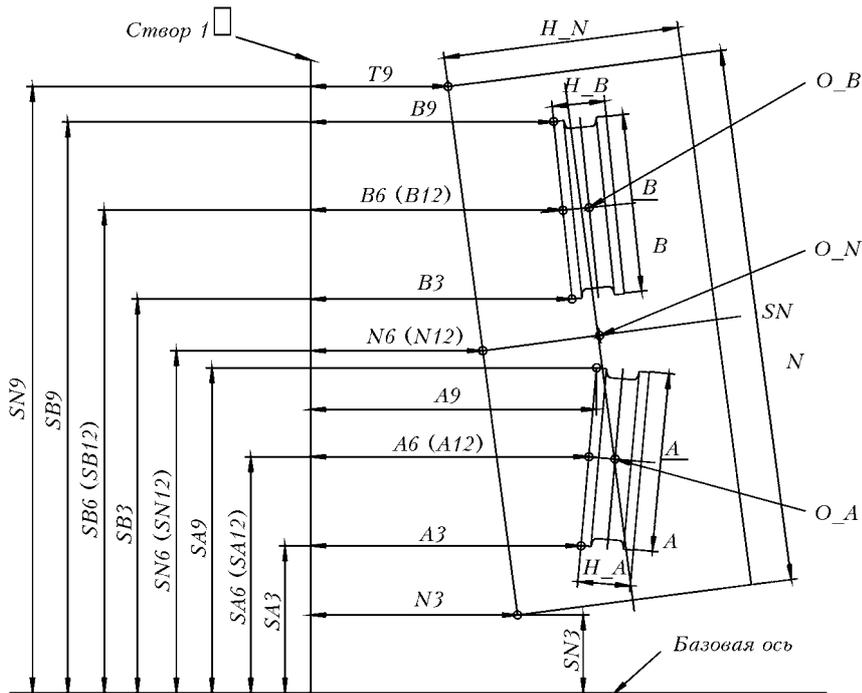


Рис. 2. Схема проведения измерений

задание базовой оси (однозначно ориентированной в пространстве);
 построение параллельных плоскостей (створов);
 проведение измерений для контрольных точек (визуальная регистрация).

Для решения конкретной задачи возможно два варианта базовой оси.

I. Базовая ось располагается на высоте пролетного строения и параллельна ездовому монорельсу крана: 1 — экран-марка; 2 — теодолит; 3 — подвесная люлька для исполнителя; 4 — подвесная подставка для теодолита, 5–7 — точки, образующие плоскость измерений; 8 — домкрат; 9 — удлинитель. Параллельные плоскости располагаются на некотором расстоянии от опор (снаружи), не превышающем длины линейки приспособления. Эта длина рассчитывается таким образом, чтобы габариты крана не препятствовали измерениям. По результатам измерений определяется расположение балансирных тележек и ходовых колес относительно пролетного строения (ездового монорельса-двутавра). Основным недостатком этого варианта: значительные материальные затраты — демонтаж тележки, грузовых и тяговых канатов, изготовление двух экранов и подвесной люльки для исполнителя, регулируемой подвесной подставки для теодолита.

II. Базовая ось располагается на уровне ходовых колес крана и перпендикулярна оси подкранового рельса. Параллельные створы располагаются (как и в варианте I) на некотором расстоянии от рельса (снаружи). Измерения проводятся способом бокового нивелирования с помощью оптического створа, задаваемого визирной осью теодолита (рис. 2). По результатам измерений определяется расположение балансирных тележек и установка ходовых колес (рис. 3). Ос-

новной недостаток этого варианта: невозможность определения положения ездового монорельса-двутавра. Однако, поскольку передвижение грузовой тележки осуществляется с помощью канатной тяги, то угол наклона ездового двутавра в вертикальной плоскости не оказывает влияния на кинематику движения крана в целом.

Для каждого положения проводятся замеры с одной установки для всех колес и всех балансирных тележек. Такой порядок проведения замеров обеспечит получение исчерпывающей информации об установке ходовых колес данного крана.

На схеме проведения измерений контрольных точек (рис. 2–4) приняты следующие обозначения: A, B, C, D, E, F, G, K — колеса; N, P, Q, R — балансирные тележки; H — ширина колеса (или тележки); O — центр колеса (или тележки) с индексом — принадлежит колесу (или тележке); S — расстояние от базовой оси до контрольной точки.

Индекс возле букв H показывает, к какому колесу (или тележке) относится данный размер.

Каждая контрольная точка характеризуется двумя величинами:

расстоянием от створа до контрольной точки (обозначается буквой с индексом: буква указывает на колесо (или тележку), индекс указывает точку (часового циферблата); расстоянием от базовой оси до контрольной точки (перед обозначением по 1) ставится буква S).

По нашему мнению, второй вариант, при одинаковой технологии проведения и точности измерений, является менее затратным по временным и материальным показателям.

В связи с тем, что была нарушена технология сборки крана, которая регламентируется ГОСТ 27584–88 — не была выполнена контрольная сборка крана на монтажном участке пути (так называемая ступенчатая сборка с замером параметров) — для любого варианта базовой оси необходимо сделать не менее пяти замеров.

1. Исходное положение — кран под собственным весом опирается на рельсы. Рельсовые захваты распушены, под все колеса установлены башмаки.

2. Колеса балансирных тележек со стороны кабины находятся в вывешенном состоянии (до 20 мм). Подъем из положение 1 проводится с помощью домкрата, который через удлинитель поднимает пролетное строение (рис. 1). Домкрат опирается через подставку на шпалы в районе колонны. Удлинитель крепится к мосту в месте присоединения опор.

3. Колеса балансирных тележек со стороны кабины опираются на горизонтальный стол через

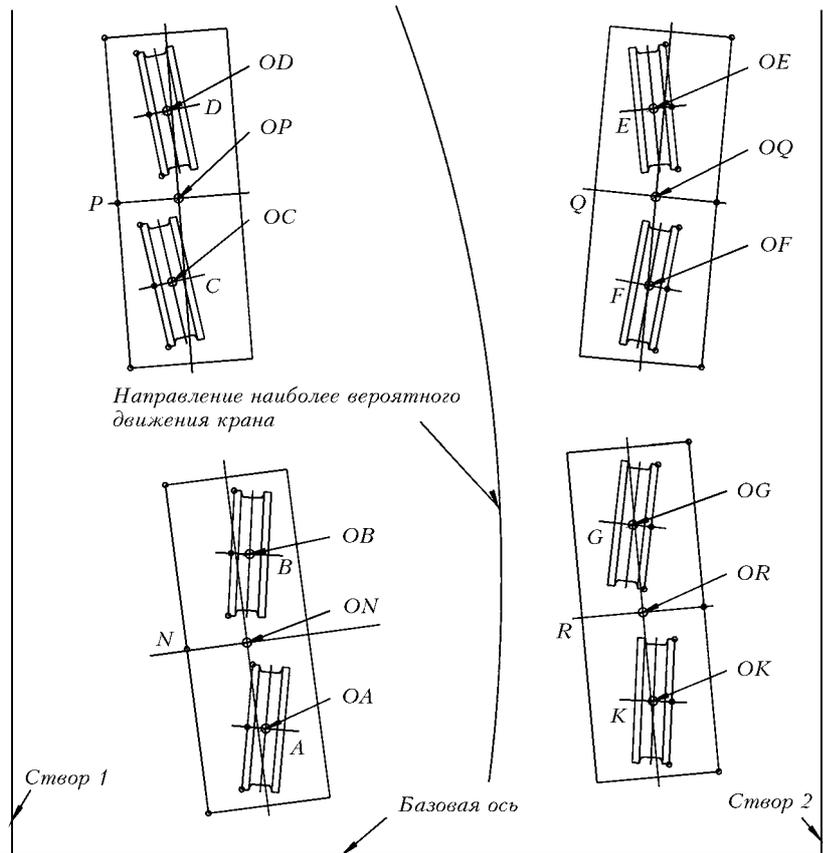


Рис. 3. Графическое представление результатов измерений

промежуточную опору (рис. 4). Опускание из положения 2 проводится с помощью домкрата.

Следующие два положения 4 и 5 повторяют положение 2 и 3, только для противоположной стороны крана.

Замеры в положения 2 и позволят определить изгибную жесткость данной стороны крана.

На рис. 4 показаны контрольные точки для колес (A, B) и балансирной тележки (N), где точки 3 и 9 используются при регистрации отклонений в горизонтальной плоскости, а точки 12 и 6 — в вертикальной.

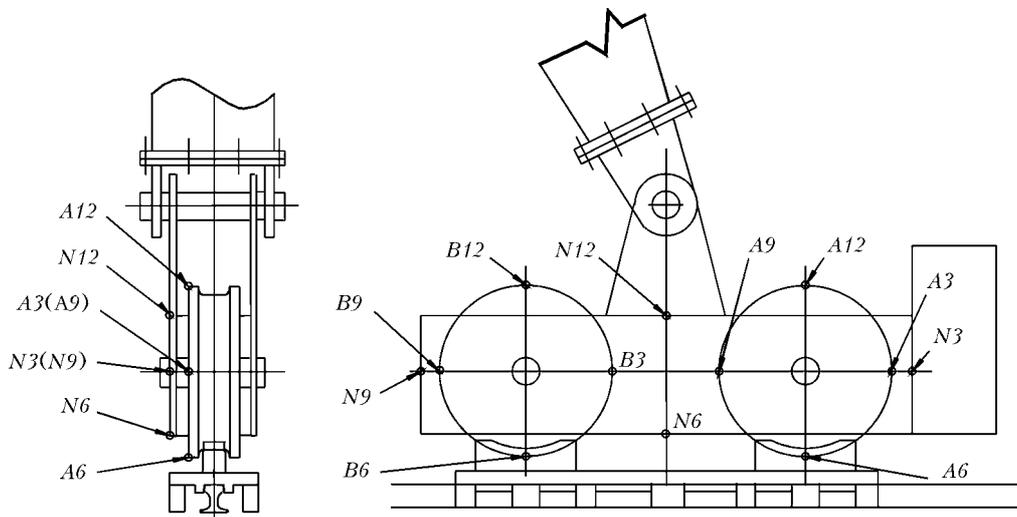


Рис. 4. Схема контрольных измерений

До проведения замеров по рассматриваемой методике необходимо:

провести контрольную нивелировку и выполнить рихтовку (ремонт) подкрановых путей [12] с допусками в два раза меньше, чем предельные отклонения [6, 7];

выполнить подготовительные работы, включающие удаление регулировочных прокладок между осями балансиров и опорами крана; фиксацию балансиров от осевого смещения; подготовку отверстий на балансирных тележках для замеров (не прожигать!), установку штатных стопорных планок.

Алгоритм проведения измерений включает:

разметку базовой оси перпендикулярно оси рельса в начале подкранового пути. При этом теодолиты устанавливаются на штативах (или на специальных подставках) на базовой оси с двух сторон пути на некотором удалении от рельса, не превышающем длины линейки приспособления (длина рассчитана так, чтобы габариты крана не препятствовали измерениям);

установку зрительной трубы теодолита — на уровне центра оси ходового колеса.

Между теодолитами с помощью оптического отвеса берется отсчет по рулетке S:

установку (строго вертикально) экрана — марки в конце рельсового пути (на расстоянии S между собой). Назначение экран-марок в конце рельсового пути — обеспечение периодического контроля створа;

маркировку места установки теодолитов и экранов для возможности продолжения измерений на следующий день (или контроля);



проверку параллельности заданных створов любым удобным способом (требуемая точность взаимной параллельности створов не ниже 20'');

определение горизонтальных перекосов балансирующих тележек и ходовых колес, а также непараллельности осей, соединяющих их центры, путем измерения отрезков от створов до боковых поверхностей тележек и колес в соответствии со схемой, приведенной на рис. 2, 3 (используются контрольные точки 3 и 9);

определение расстояния от базовой оси до всех контрольных точек, толщину колес и ширину тележек.

Для определения вертикальных перекосов балансирующих тележек и ходовых колес согласно схемы на рис. 4 измеряют отрезки от створов для точек 12 и 6.

После проведения полного комплекса высокоточных измерений проводится расчет для каждого из пяти положений (в горизонтальной и вертикальной плоскостях):

углов установки колес и тележек;
координат центров колес и тележек;
расстояний между центрами тележек;
расстояний между центрами парных колес (пролет крана);

непараллельности осей тележек;
непараллельности осей парных колес.

Полученные расчетные данные позволяют определить необходимые и достаточные величины взаимных перемещений тележек и регулировок колес для исправления допущенных при монтаже отклонений и обеспечения прямолинейного движения крана.

Следует отметить, что суммарная ошибка определения установки колес способом параллельного оптического створа складывается, в основном, из ошибок визирования, перефокусировки зрительной трубы теодолита, отсчета по линейке, центрирования теодолита и экран-марки.

Выводы

1. Определение фактических параметров козлового крана КСК-32 решает первую часть проблемы — позволяет разработать предложения по устранению причин неудовлетворительной работы механизма передвижения крана с учетом технической возможности и экономической целесообразности.

2. Выбранное решение должно учитывать специфику конструкции модернизированного крана и технологические особенности выполнения подъемно-транспортных операций: установку поворотного оголовка; транспортировку груза на консоли; ветрозащитные мероприятия и в любом случае предполагают модернизацию, в первую очередь, механизма передвижения крана, в том числе и конструкции ходовых тележек.

1. Коваленко В. А. Правовое регулирование безопасности инновационных технических объектов повышенной опасности // Технічний прогрес та ефективність виробництва: Вісник Харків. держ. політех. ун-ту. Спец. вип. «Інтелектуальна власність». Зб. наук. праць. Вип. 93: Харків, ХДПУ. — 2000. — С. 54–57.
2. Печников О. С. Так кто же виноват? // Подъемные сооружения. Спец. техника. — 2002. № 11. — С. 25–27.
3. Иванов В. Н., Дейнега В. И. Пока гром не грянет ... // Там же. — 2002. — № 9. — С. 30.
4. Патон Б. Е. О состоянии работ в Украине по технической диагностике промышленного оборудования, конструкций и сооружений. — Докл. на 3-м расширенном заседании технического комитета по техн. диагностике и неразруш. контролю (ТК-78), 27 мая 1999 г. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1999. — № 3. — С. 66–68.
5. ГОСТ 27584–88. Краны мостовые и козловые электрические. Общие технические условия. — Гос. ком. СССР по стандартам. — М., 1988. — 24 с.
6. РТМ-050.318.04-024–75. Устройство, эксплуатация и капитальный ремонт подкрановых путей порталных, башенных, козловых, мостовых кранов и другого грузоподъемного оборудования. — М., 1976. — 172 с.
7. ISO 8306–85 Краны. Допуски на краны и пути. Мостовые и козловые краны. Сборник правил и требований безопасности по материалам стандартов ISO, включенных в «Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов». — ДНАОП № 0-1.03-93. — Харьков, 1996. — 76 с.
8. Невзоров Л. А., Жуков В. Г. Упорядочение работ при монтаже грузоподъемных кранов // Подъемные сооружения. Спец. техника. — 2003. — № 3. — С. 20–21.
9. Kovalenko V. A. Verschleissuntersuchungen des Lauftrassensysteme-Systems für der-technischer Anlagen unter Berücksichtigung von Kontaktgeometrie verändernder Einflussgrößen. Institut für Konstruktionstechnik der Ruhr-Universität Bochum, RUB, 1986. — 50 s.
10. Беляев Л. М. Монтаж подъемно-транспортных механизмов / Изд. 2-е, перераб. и доп. — М., Стройиздат, 1975. — 207 с.
11. Шеховцов Г. А. Современные методы геодезического контроля ходовой части и путей мостовых кранов. — Н. Новгород: Нижегород. гос. архит.-строит. ун-т, 1999. — 164 с.
12. Коваленко Ж. И. Особенности безопасной организации работ при замене подкрановых путей на предприятиях топливно-энергетического комплекса // Подъемные сооружения. Спец. техника. — 2003. — № 2. — С. 20.

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС УД-ЭМА-РСП ДЛЯ КОНТРОЛЯ БЕСКОНТАКТНЫМ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ МЕТОДОМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТОАКУСТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

В. И. ГОРДЕЛИЙ, Н. Г. ЛЕЩЕНКО

Комплекс УД-ЭМА-РСП предназначен для использования в автоматизированных установках неразрушающего контроля изделий сложной формы в затрудненных условиях контроля (загрязненность поверхности контроля, значительная шероховатость, широкий температурный диапазон поверхности контролируемого объекта). Ограничение в выборе типов ультразвуковых волн требует поиска новых методов возбуждения и приема ультразвуковых колебаний, использование микропроцессорной техники для обработки и выделения полезного сигнала и подавления шумов.

В основу программно-аппаратного комплекса для контроля рельсов положен бесконтактный электромагнитоакустический метод. Это позволило исключить применение контактной жидкости, поднять производительность контроля, а также обеспечить документирование результатов контроля.

Комплекс обеспечивает возбуждение и прием трех типов ультразвуковых волн без применения контактирующей жидкости:

- ввод сдвиговых поляризованных УЗК по нормали к поверхности;
- ввод сдвиговых УЗК, распространяющихся под углом 45° к поверхности контроля;
- возбуждение рэлеевской (поверхностной) волны в головке рельса.

Аппаратура обеспечивает возбуждение различных типов волн в широком диапазоне частот.

Количество каналов для каждого типа волн не ограничено и может колебаться в зависимости от потребности заказчика.

Электронная стойка управляется многофункциональным вычислительным комплексом (ВК) на базе PC Pentium-III, позволяющим в реальном режиме времени проводить обработку полученных с предварительных усилителей сигналов, автоматически находить дефекты в рельсах, определять их координаты.

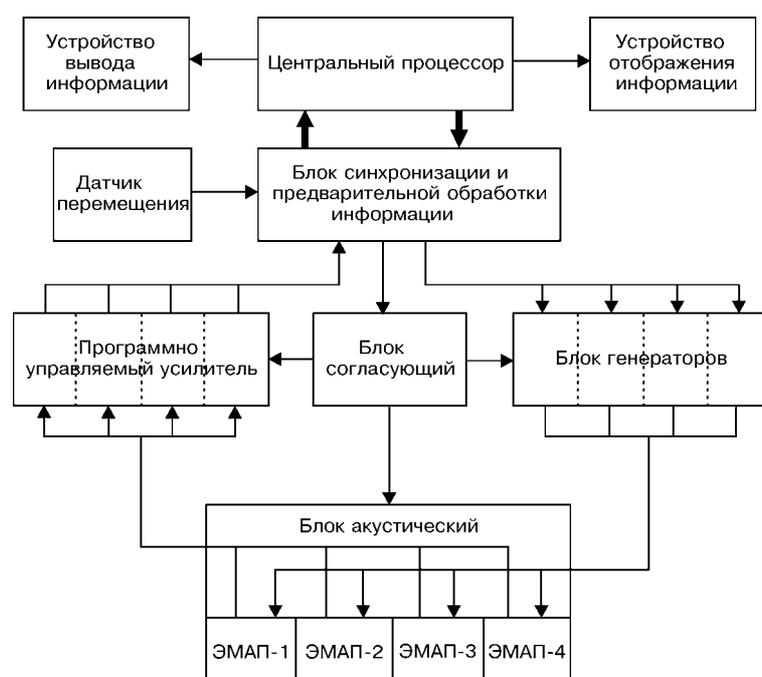


Рис. 1

В комплект ЭМА аппаратуры входят ЭМА преобразователи различных типов:

- ЭМА преобразователь для возбуждения УЗК по нормали;
- ЭМА преобразователь для возбуждения УЗК под углом 45° .
- преобразователи для возбуждения волны Рэлея;
- комбинированные ЭМА преобразователи, возбуждающие одновременно УЗК по нормали и под углом 45° .

Габаритные размеры ЭМА преобразователей могут колебаться в широком диапазоне в зависимости от поставленной задачи по выявлению дефектов.

Опыт эксплуатации установки показал, что на этапе сравнительных испытаний настоящая установка зарекомендовала себя как более эффективная по сравнению с традиционными средствами неразрушающего контроля.

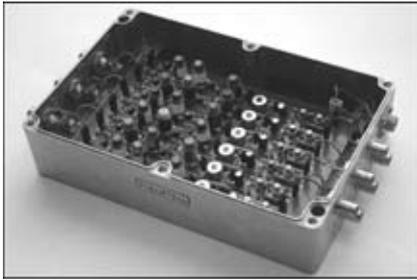


Рис. 2

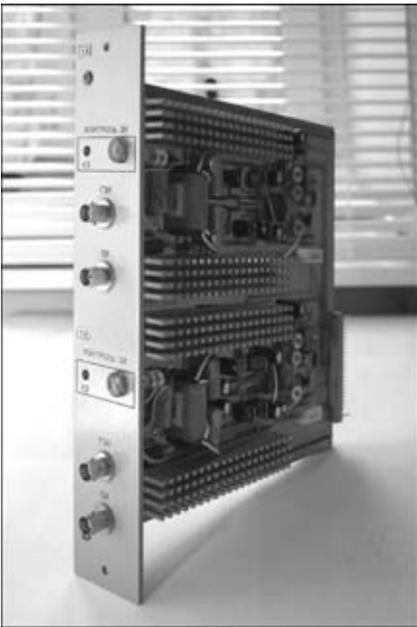


Рис. 3

За время эксплуатации на Октябрьской железной дороге установки РСП-21 было выявлено 3282 дефекта, при повторном контроле традиционным методом прибором «Авикон-0,1» — 973 дефекта. Данные результаты свидетельствуют о эффективности электромагнитоакустического метода контроля.

Программно-аппаратный комплекс (**показан на первой странице обложки**) может быть использован для создания установок по контролю колесных пар подвижных составов как на движущихся поездах, так и на ремонтных предприятиях железнодорожного транспорта.

Центральный процессор установки синхронизирует работу всех узлов установки, производит обработку акустических сигналов, формирует развертки типа «А» и «Б».

Блок синхронизации и предварительной обработки информации вырабатывает синхроимпульсы для запуска генераторов зондирующих импульсов, производит обработку сигналов, поступающих с усилительного блока (рис. 2) и датчика перемещения.

Генераторный блок (рис. 3) вырабатывает зондирующие импульсы нужной длительности и амплитуды, которые поступают на ЭМА преобразователи (рис. 4).

Акустический блок состоит из четырех ЭМА преобразователей и служит для возбуждения и приема УЗК в контролируемом объекте.

Программно управляемый усилитель служит для обработки сигналов, поступающих с ЭМА преобразователей по амплитуде и частоте.

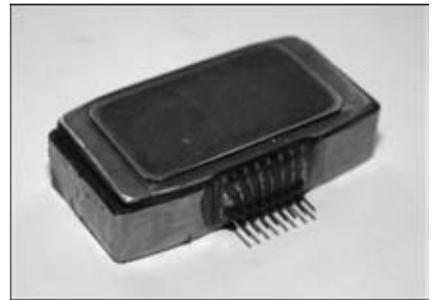


Рис. 4

Основные технические характеристики

1. Частоты УЗК по каналам, МГц
 - прямой канал 1,8
 - наклонный канал 1
 - канал Рэлея 0,5; 0,25
2. Частота следования зондирующих импульсов, кГц 0...2
3. Угол ввода УЗК, α, град
 - прямой канал 0
 - наклонный канал 45
 - канал Рэлея 90
4. Чувствительность к дефекту: выявляется плоскодонный отражатель диаметром 2 мм на глубине 50 мм
5. Чувствительность усилится по каждому каналу, мкВ, не хуже 1
6. Импульсная мощность зондирующих импульсов по каждому каналу не менее, кВт 30
7. Номинальная потребляемая мощность, В·А, не более 200

**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**



Инженерная фирма **ИНКОТЕС**

- разработчик и изготовитель
диагностических приборов и
программного обеспечения

603950 г.Нижний Новгород, ГСП-76, ул.Бринского,6
Т/ф: (8312) 60-67-00 E-mail: info@encotes.ru Web : http://www.encotes.ru

Портативный диагностический анализатор "АДП-3101"



Прибор АДП-3101 является миниатюрной диагностической лабораторией "на ладони" с большим набором функций анализа сигналов для углубленной диагностики дефектов.

Предназначен для автоматизированной диагностики и мониторинга состояния энергомеханического оборудования в процессе его работы, в том числе, на опасных промышленных объектах, балансировки роторов, исследований и испытаний в области динамики и вибрации машин, автоматизированного поиска утечек в водопроводах и продуктопроводах.

При использовании прибора "АДП-3101" не требуется применение компьютеров и другого вспомогательного оборудования, так как диагностические программы хранятся во флэш-памяти прибора (до 256 МБ).

Прибор "АДП-3101" имеет 4 входа для подключения различных датчиков, принцип действия основан на 2-х канальной обработке измеряемых сигналов.

В приборе "АДП-3101" для загрузки диагностических программных модулей, передачи собранных данных и результатов диагностики в базу данных для длительного системного хранения используется высокопроизводительная шина USB

Технические характеристики

Частотный диапазон: 1-24000 Гц (8 поддиапазонов)
Частоты установки 1/3 октавного фильтра детектора огибающей: 1,5-32 кГц (шаг 1,5 кГц)
Диапазон измерения вибропараметров (частота 159,2 Гц):
виброускорения - 0,2-200 м/с²; виброскорости - 0,2-200 мм/с; виброперемещения - 0,2-200 мкм
Диапазон измерения переменного напряжения 1мВ - 12В
Количество линий спектра: 200, 400, 800, 1600, 3200, 6400
Погрешность измерения: не более ±5%
Исполнение по классу "1ExibIIBT4X"
Время непрерывной работы без подзарядки: не менее 8 часов
Рабочий диапазон температур: -10...+55°C
Масса: 1,5 кг

Течеискатель Т-2001



Назначение

Оперативное обнаружение утечек и несанкционированных ответвлений в подземных водопроводах, тепловых сетях, продуктопроводах.

Особенности

В приборе используется усовершенствованный спектрально-акустический метод поиска утечек.

Метод отработан в реальных условиях в процессе аварийных устранений утечек на водопроводах и тепловых сетях.

Прибор Т-2001 является 2-х канальным анализатором сигналов. Два высокочувствительных пьезодатчика и БПФ-анализ сигналов позволяют локализовать самые незначительные утечки.

Точность определения места утечки составляет 0,1% от длины обследуемого участка. Специальные режимы расчета скорости звука, когда она неизвестна и подавления паразитных периодических сигналов (от насосов, транспорта и т.п.) позволяют существенно повысить точность определения утечки.

Прибор Т-2001 обнаруживает утечку и в том случае, если предполагаемое место аварии визуально определено неверно и утечка находится не между исследуемыми колодцами, а на одном из соседних участков.

Область применения

Стальные и чугунные трубы водоводов, теплосетей, продуктопроводов
Диаметр трубопровода: 50-1200 мм, возможно использование на трубопроводах больших диаметров
Рабочее давление: 0,5...50 атм.
Минимальный диаметр утечки: 5-10 мм
Длина обследуемого участка трубы за одну установку: До 1000 м
Цикл измерения: 1-2 мин

Испытания прибора Т-2001 на Нижегородских водопроводах и тепловых сетях показали, что он выявляет более 90% контролируемых утечек.

Другое оборудование: виброанализаторы, сборщики данных, тахометры ручные оптические, измерители механических напряжений



“ДИАГНОСТИКА И КОНТРОЛЬ”

ООО НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЦЕНТР

54056, г. Николаев, а/я 234 тел/факс (0512) 210-220 E-mail: Diagnostic@mksat.net

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СКАНИРУЮЩИЙ ТОЛЩИНОМЕР УТ-98 «СКАТ»

Толщиномер используется для измерения толщины изделий из различных металлов и сплавов при одностороннем доступе в процессе эксплуатации или изготовления. Рекомендуется для применения на энергетических, химических, машиностроительных, транспортных, трубопрокатных, нефтегазодобывающих и перерабатывающих комплексах и других предприятиях.



ВСТРОЕННАЯ МИКРОЭВМ ОБЕСПЕЧИВАЕТ:

- автокалибровку и самотестирование;
- статистическую обработку результатов, накопление и последующую передачу в ПЭВМ по каналу RS232;
- запоминание результатов 4000 измерений с файловой организацией памяти (до 40 файлов), удобство хранения и быстрый доступ к информации;
- автоматическое нахождение минимального значения толщины в области сканирования преобразователем контролируемого объекта в режиме «быстрый скан».

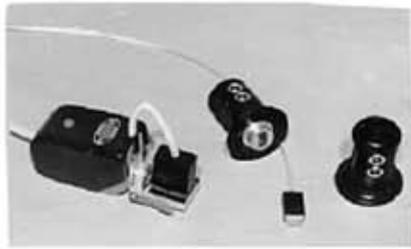
ТОЛЩИНОМЕР ОТЛИЧАЕТСЯ ОТ ИЗВЕСТНЫХ АНАЛОГОВ:

- дополнительным режимом «Рельеф», позволяющим непрерывно измерять толщину на длине до 8 метров с координатной привязкой к контролируемому объекту, и отображать этот рельеф на экране компьютера;
- автоматической установкой при включении толщиномера в тот режим, файл и точку измерения, в которых находился в момент выключения.

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИБОРА И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

1. Диапазон контролируемых толщин, T , мм 0,5...300
2. Скорость распространения ультразвука, м/с 1000...15000
3. Основная погрешность измерения t , мм, по диапазонам $T=0,5...20,0$ $\pm 0,05$
 $T=20...300$ ($0,002T+0,05$)
4. Габариты прибора, мм 157x85x30
5. Питание аккумулятор «НИКА», батареи «КРОНА», «КОРУНД»
6. Диапазон рабочих температур для прибора $-20^{\circ}\text{C}...+50^{\circ}\text{C}$
7. Диапазон рабочих температур для преобразователей $-40^{\circ}\text{C}...+60^{\circ}\text{C}$
8. Масса прибора с источником питания, кг 0,3

Толщиномер комплектуется преобразователями с повышенной износостойчивостью и чувствительностью, что увеличивает срок их службы и позволяет контролировать изделия под слоем краски, ржавчины и по грубо обработанной поверхности.



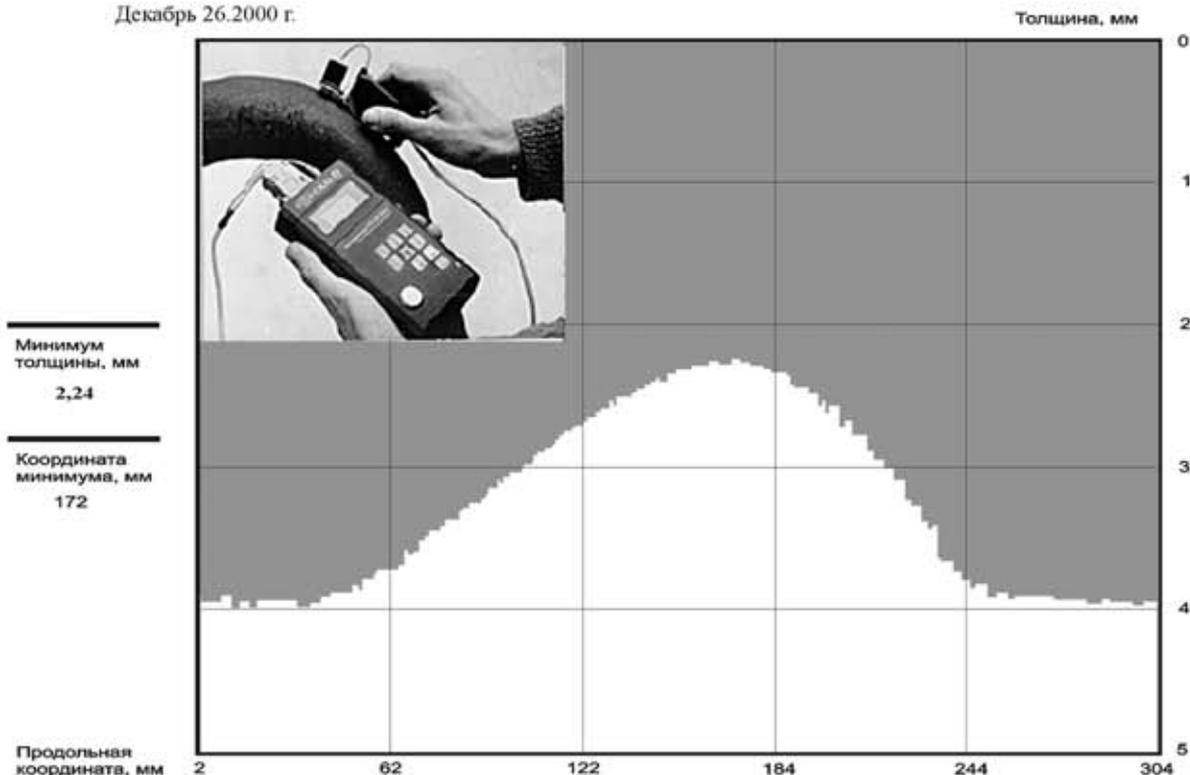
Преобразователи	Измеряемая толщина T, мм	Минимальный радиус изделия, мм	Рабочая поверхность, мм	Габариты преобразователя, мм
П-112-5-10/2-А-01	1,0-300	5	∅13	∅22x45
П-112-10-6/2-А-01	0,6-80	3,0	∅9,5	10x12x20
П-112-5-8/2-А-01	1,0-100	7	∅18	∅20x25
*П112-10-2x3/М	0,5-20	1,0	2x6	9x8x15

*Поставка по желанию заказчика.

Для толщиномера разработаны специализированные преобразователи, сканирующие устройства и пакеты программ, позволяющие автоматизировать процесс измерения и обработки результатов контроля для таких объектов, как:

- теплообменные аппараты тепловых и атомных электростанций;
- установки комплексной подготовки газа газоперерабатывающих станций;
- лопатки газовых турбин.

Декабрь 26.2000 г.



Пример отображения остаточной толщины (рельефа)гиба трубы

Комплект поставки

Измерительный блок с двумя преобразователями, миниатюрное сканирующее устройство со встроенным датчиком пути и преобразователем для снятия показаний в режиме рельеф, аккумулятор с зарядным устройством, паспорт, руководство пользователя, метрологическое свидетельство, дискета с программным обеспечением, кабели, чехол измерительного блока, упаковочная тара.

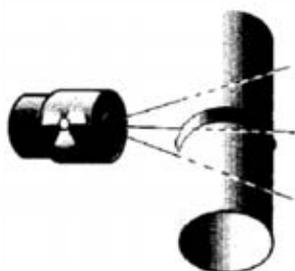
По желанию заказчика поставка в комплекте с компьютером и спецпрограммами. Срок поставки — 3 недели, гарантийный срок эксплуатации — 1 год, сервисное обслуживание.

Толщиномер сертифицирован Госстандартом Украины Госреестр №У1447-01



ІЗОТОП

Неразрушающий контроль:



Рентгеновские дефектоскопы типа
АРИНА, РАТМИР

Толщиномеры покрытий

*Рентгенографическая пленка и
 химреактивы фирм "Свема", "AGFA", "FOMA"*

Принадлежности для радиографии: шаблоны сварщика, экраны
 усиливающие, мерные пояса, эталоны чувствительности

Наборы для цветной капиллярной дефектоскопии

03680, ГСП, г. Киев, ул. Горького, 152, телефон/факс: (044) 268-90-00
E-mail: ndt@izotop.kiev.ua



НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ФИРМА «ПРОМСЕРВИСДИАГНОСТИКА»

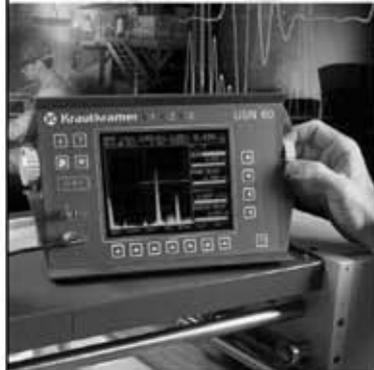
Тел/факс: (044) 227-88-13, 261-54-74. Телеграммы: Киев 5, СТЫК. Телетайп: 132174, СТЫК

Наша фирма на протяжении многих лет, используя собственную материальную базу и современные методы неразрушающего контроля и оценки результатов испытаний, проводит работы по техническому диагностированию сосудов, работающих под давлением; резервуаров для хранения нефтепродуктов, реагентов и химической продукции; грузоподъемных механизмов; паровых, водонагревательных котлов и котлов-утилизаторов; технологического оборудования нефтеперерабатывающих заводов, газонефтепроводов и нефтепродуктопроводов; сооружений, установок и оборудования нефтегазовых промыслов; систем подготовки нефти и газа к транспортировке, АГНКС; криогенного оборудования (Разрешение № 575.01.30-31.62.3, выданное Государственным департаментом по надзору за охраной труда 21.07.2001 г.), а также выполняет работы по ремонту грузоподъемных кранов, наливных емкостей и сосудов, работающих под давлением (Разрешение № 118.02.18 от 19.07.02).

За это время специалисты фирмы провели с субподрядчиками исследования характера расслоений газовых сепараторов, исследовали причины разрушений подземных магистральных трубопроводов, сосудов высокого давления с технологическими обвязками, резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов, технологического оборудования и газораспределительных станций ОАО «Укрнафта» (НГДУ «Охтырканефтегаз»), ДП «Харьков-трансгаз» и других предприятий, обнаружили десятки единиц оборудования, имеющего опасные дефекты, и устранили их.

При наличии с Вашей стороны предложений по диагностированию технологического оборудования, а также по ремонту особо ответственных объектов с использованием ремонтных сварочных технологий — мы готовы к сотрудничеству.

Krautkramer



USM 60 — универсальный ультразвуковой дефектоскоп



Серия ультразвуковых толщиномеров **DM 4** — надежность и проста эксплуатации



DMS 2 — универсальный ультразвуковой толщиномер с расширенными возможностями. Позволяет проводить измерения толщины с одновременным наблюдением последовательности отраженных сигналов, в том числе с разверткой типа В

Новинка



USM 35 — новый портативный ультразвуковой дефектоскоп, пришедший на смену USM 25. В приборе применен современный цветной жидко-кристаллический индикатор с высокой контрастностью, большим углом обзора, беспараллаксной сеткой. Использование цветного индикатора дает оператору дополнительные возможности при проведении контроля



Широкий выбор преобразователей для различных задач

А также:

- твердомеры статического и динамического типа (ДинаMIC, ДинаРОСЕТ, MIC 10, TIV)
- вихретоковые дефектоскопы (PHASEC 2200)
- трещиномеры (X-RT 900).

Согласно письма № 341/О Р от 25.02.2004 компания Джeneral Электрик Инспекшн Текнолоджи Системз ГмБХ - Крауткramer Ультрасоник Системс, Германия, обеспечивает гарантии фирмы-поставщика, гарантийное и послегарантийное техобслуживание на оборудование, закупленное у НПФ "Диагностические приборы".

Адрес офиса: Киев, пр. Московский, 21, 3 этаж, оф. 5
Для писем: 04050, Киев-50, а/я 50
Тел./факс: (044) 467-76-32, 467-76-33
www.ndt-ua.com ut@ndt-ua.com

Диагностические приборы
НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ФИРМА

ПРЕДЛАГАЕМ УСЛУГИ ПО ОБРАБОТКЕ РЕНТГЕНОВСКИХ СНИМКОВ

Уважаемые коллеги!

На основе разработанного программно-аппаратного комплекса для компьютерной обработки рентгеновских снимков сварных соединений предприятия, работающие с радиографическими снимками, имеют возможность:

- ◆ создать компьютерную базу данных изображений, полученных при радиографии;
- ◆ поднять качество изображения рентгеновских снимков;
- ◆ повысить оперативность и достоверность анализа изображений.

Этот программно-аппаратный комплекс, состоящий из слайд-сканера, компьютера, принтера, представляет собой Автоматизированное Рабочее Место Дефектоскописта (АРМД).

Предлагаем Вам услуги по обработке предоставленных Вами снимков. Просим сообщить нам, насколько это интересно для Вашей организации, желаете ли Вы создать на своем предприятии подобное Рабочее Место.

В Отделе неразрушающих методов контроля Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины в период с 4 ноября с.г. начинается демонстрация возможностей Рабочего Места по обработке рентгенограмм. Приглашаем всех желающих провести компьютерную обработку Ваших рентгенограмм.

ул. Боженко, 11, отд. 4, ИЭС им. Е. О. Патона, г. Киев-150, 03680
Тел.: (044) 227-16-66, факс: 220-94-82

**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
 - ◆ грузоподъемных 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 плоскодонными сверлениями в соответствии с требованиями нормативных документов

03680, г. Киев-150, ГСП, ул. Боженко, 17
Тел.: (044) 261-51-75; 261-51-83



ПОЧЕМУ ВЫБИРАЮТ ТОЛЩИНОМЕРЫ STRESSTEL

ВОСЕМЬ ТОЛЩИНОМЕРОВ — ВОСЕМЬ ОСОБЕННОСТЕЙ:

- #1 T-Mike P — недорогой
- #2 T-Mike B — для пяти материалов
- #3 T-Mike E — наиболее популярный
- #4 T-Mike ES — для высокоскоростного сканирования
- #5 T-Mike EL — с отображением профиля изделия и памятью
- #6 T-Mike EM — расширенные возможности и удобство в работе
- #7 T-Mike EM+ — наличие режима "Через краску"
- #8 T-Scope III — с A-Scan разверткой, отображением профиля изделия, памятью и возможностью хранения данных в компьютере.

Универсальный ультразвуковой дефектоскоп FlawMike



У FlawMike большой высококонтрастный дисплей. Дефектоскоп удобен в использовании благодаря отдельным клавишам для каждой функции. Нажатием на соответствующую клавишу изменяется усиление, включается подсветка, распечатывается протокол контроля, выводятся на экран все текущие установки прибора.

VoitMike III — ультразвуковой измеритель усилия зажима резьбовых соединений



Большой, яркий и удобный для просмотра дисплей, быстрая калибровка и настройка, автоматическая компенсация температурных изменений гарантируют быстрые, повторяемые и точные измерения напряжения в болтовых соединениях, которые могут понадобиться во многих отраслях промышленности.



STRESSTEL
ULTRASONIC TESTING EQUIPMENT

Официальный представитель: "Ультракон"

Адрес офиса: Киев, б-р. И. Лепсе, 46
Для писем: 03126, Киев, а/я 507/8
тел./факс: (044) 404-70-33, 404-03-69
E-mail: ultracon@ukrpack.net

УЛЬТРАКОН
Средства неразрушающего контроля

Дистрибутор: "ДП-Тест"

Адрес офиса: Киев, ул. Дорогожичская, 1, оф. 404
Для писем: 04050, Киев-50, а/я 50
тел./факс: (044) 247-67-18, 495-11-45
E-mail: support@ndt-ua.com

ДП-ТЕСТ

Более подробная информация об ультразвуковых толщиномерх STRESSTEL на интернет-портале неразрушающего контроля в Украине: www.ndt-ua.com

ПОДПИСЫВАЙТЕСЬ НА ЖУРНАЛЫ ИЭС ИМ. Е.О. ПАТОНА



«Техническая диагностика и неразрушающий контроль»

4 выпуска в год, подписной индекс 74475,
издается с 1989 г.,
тел.: (38044) 261 58 81, 269 26 23



«Современная электрометаллургия»

4 выпуска в год, подписной индекс 70693,
издается с 1985 г.,
тел.: (38044) 269 26 23, 268 34 84,
(с 1985 по 2002 гг. журнал издавался под названием
«Проблемы специальной электрометаллургии»)



«Advances in Electrometallurgy»

перевод на английский язык журнала «Современная электрометаллургия»
4 выпуска в год, подписной индекс 01141,
тел.: (38044) 269 26 23, 268 34 84



«Автоматическая сварка»

12 выпусков в год, подписной индекс 70031,
издается с 1948 г.,
тел.: (38044) 227 63 02, 269 26 23



«The Paton Welding Journal»

перевод на английский язык журнала «Автоматическая сварка»,
12 выпусков в год, подписной индекс 21971,
тел.: (38044) 269 26 23, 227 63 02

Подписка в Украине по каталогам агентства: «Пресса» и «Идея»
Подписка в Российской Федерации по каталогу агентства «Роспечать»
Подписка через редакции журналов на годовые комплекты, отдельные выпуски и статьи.

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

Расценки на размещение рекламы в журналах:

«Техническая диагностика и неразрушающий контроль»,
«Автоматическая сварка»,
«Современная электрометаллургия»,
«The Paton Welding Journal»
«Advances in Electrometallurgy»

Стоимость рекламы на обложке, в USD

Страницы	Размер, мм	Полноцветная	Одноцветная
1	190×190	500	—
2	200×290	350	320
3	200×290	350	320
4	200×290	400	360

Стоимость блочной рекламы на внутренних страницах

Площадь	Размер, мм (ширина×высота)	Цена, USD	
		черно-белая	цветная
1 полоса	170×250	80	300
1/2 полосы	170×125	40	—
1/4 полосы	170×60	20	—
1/6 полосы	80×80	15	—

Для организаций-резидентов Украины цена с НДС и налогом на рекламу

Оплата в гривнях или рублях РФ по официальному курсу

Статья на правах рекламы — 50% стоимости рекламной площади

Скидки при размещении рекламы в двух (и более) журналах ИЭС согласовываются дополнительно

Скидки на размещение рекламы при единовременной оплате:

Количество подач	3	6	12
■ Скидка	10 %	15 %	20 %

Требования к оригинал-макетам:

Формат журнала после обрезки 200×290 мм

Черно-белые:

TIF grayscale 300 dpi для фотоизображений, TIF bitmap 600 dpi для графики

Цветные:

TIF CMYK 300 dpi

Сопроводительные материалы:

обязательна черно-белая распечатка файла

Носители:

дискеты 3,5", CD-ROM

