

# ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

## № 4, 2001

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

Издается с января 1989 г.

### СОДЕРЖАНИЕ

#### ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА

ФРОЛОВ В.Ф. Метод технического диагностирования силовых установок летательных аппаратов .....	3
ГОРОХОВ Е.В., НЕКРАСОВ Ю.Н., ЮГОВ А.М. Мультипараметрическая система динамической диагностики строительных металлоконструкций .....	5
ГИРЕНКО В.Г., ГИРЕНКО С.В., МУТАС В.В. Прочность трубопроводов и сосудов с трещиноподобными дефектами в условиях вязкого состояния конструкционных материалов .....	9
КАПУСТИН А.Э., БАРДУСОВА И.И., КОЛОСОВ В.В. Компьютерные технологии и рентгеновская дефектоскопия сварных соединений .....	14
ГЕЛЬМАН Л.М., ЗИНЬКОВСКИЙ Ю.Ф., ПЕТРУНИН И.В. Эффективность использования действительной и мнимой составляющих преобразования Фурье для диагностики усталостных трещин .....	21
БЕЖЕНОВ С.А., БУЙЛО С.И. Некоторые аспекты диагностики долговечности и предразрушающего состояния конструкционных материалов методом акустической эмиссии .....	24

#### НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

НАЙДЕНОВ С.В., РЫЖИКОВ В.Д. Радиографический метод определения атомного состава .....	28
ДОЛИНСКИЙ В.М., СТОГНИЙ В.Н., НОВИК В.Г., РЯЗОВ Д.Г., ЧЕРЕМСКАЯ В.И., БЕЗЛЮДЬКО Г.Я., ЕЛКИНА Е.И., ИЛЬИНСКИЙ А.И. Анализ разрушений и возможности контроля состояния металла кислородных баллонов .....	33
ИГУМЕНЦЕВ Е.А., ТАРГОНСКИЙ В.А. Демодуляция помпажных колебаний нагревателя с помощью спектрального анализа огибающей лопаточной вибрации .....	36
БАЖЕНОВ В.Г., ЛИГОМИНА С.М. Багатошкільний метод визначення фазової швидкості ультразвуку .....	40
РЫБАЧУК В.Г. Анализ погрешностей, обусловленных влиянием зазора, при вихретоковых измерениях коэффициента анизотропии электропроводности .....	42
НЕСТЕРЕНКО Н.П., НЕЗАМАЙ Г.Г., ТАНЦЮРА Т.П. Полиморфные переходы в ориентированном поликапроамиде при ультразвуковой сварке .....	46
МЕЛЬНИК С.И., КУХАРЕВ Ю.А. Учет влияния внешних факторов при проведении теплового контроля трубопроводов .....	50
ГУЗ Ю.Т. Диагностика технических состояний магнитных, контактноподвижных и электрических подсистем в электромагнитных системах .....	53
ПОРЕВ В.А. Компенсация излучения электрода при исследовании температурного поля зоны плавки .....	55
БЕЛЫЙ Н.Г., ПОЛОНСКИЙ А.Я., БУХЕНСКИЙ В.Н., ПАВЛИЙ А.В. Экспериментальные исследования радиографической пленки СТРУКТУРИКС F8 фирмы АГФА-ГЕВАРТ .....	57

#### ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ

МОЗГОВОЙ А.В. 9-й Международный семинар-выставка «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики» .....	59
В Украинском обществе НК и ТД .....	60
Вітаємо ювілярів! .....	61
Информационное сообщение .....	62
Рефераты статей .....	63
РЕКЛАМА .....	66

#### 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. И. Степаненко,  
В. А. Стрижало, А. Я. Тетерко,  
А. Ф. Улитко, 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, 269-26-23  
Факс: (044) 268-04-86  
E-mail: journal@paton.kiev.ua  
http://www.nas.gov.ua/pwj

#### Научные редакторы

Ю. Н. Посыпайко, А. А. Грузд

#### Редактор

Г. В. Ольшевская

#### Электронная верстка

Н. Н. Кравченко, А. И. Сулима,  
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

Журнал издается при содействии:

Технического комитета по стандартизации «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»



Украинского общества неразрушающего контроля и технической диагностики

# TECHNICAL DIAGNOSTICS and NON-DESTRUCTIVE TESTING

№ 4, 2001

Founded in January, 1989

The National Academy of Sciences of Ukraine  
The E. O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine  
International Association «Welding»

## CONTENTS

### TECHNICAL DIAGNOSTICS

<i>FROLOV V.F.</i> Method of technical diagnostics of propulsion units in flying vehicles .....	3
<i>GOROKHOV E.V., NEKRASOV Yu.N., YUGOV A.M.</i> Yugov Multiparametral system of dynamic diagnostics of building metal structures .....	5
<i>GIRENKO V.G., GIRENKO S.V., MUTAS V.V.</i> Strength of pipelines and vessels with crack-like defects in structural materials, being in the tough state .....	9
<i>KAPYSTIN A.E., BARDUSOVA I.I., KOLOSOV V.V.</i> Computer technologies and X-ray defectoscopy of welded joints .....	14
<i>GEIMAN L.M., ZINKOVSKY Yu.F., PETRUNIN I. V.</i> Effectiveness of using the actual and imaginary component of Fourier transformation for diagnostics of fatigue cracks .....	21
<i>BEZHENOV S.A., BUILO S. I.</i> Some aspects of diagnostics of the fatigue life and prefailure condition of structural materials by the acoustic emission method .....	24

### NON-DESTRUCTIVE TESTING

<i>NAIDENOV S.V., RYZHIKOV V.D.</i> Radiography method for determination of the atomic composition .....	28
<i>DOLINSKY V.M., STOGNII V. N., NOVIK V. G., RYAUZOV D. G., CHEREM-SKAYA V. I., BEZLUDKO G. Ya., ELKINA E. I., ILLYNSKYA. I.</i> Analysis of failures and controllability of the condition of oxygen bottle metal .....	33
<i>IGUMENTSEV E. A., TARGONSKY V. A.</i> Demodulation of pumping oscillations of the booster, using spectral analysis of vane vibration envelope .....	36
<i>BAZHENOV V. G., LIGOMNA S. M.</i> Multi-scale method of determination of phase velocity of ultrasound .....	40
<i>RYBACHUK V. G.</i> Analysis of errors due to the influence of the gap at eddy current measurement of the coefficient of electrical conductivity anisotropy .....	42
<i>NESTERENKO N. P., NEZAMAJ G. G., TANSJURA T. P.</i> Polymorphous transitions in oriented polycarpoamide in ultrasonic welding .....	46
<i>MELNIK S. I., KUKHAREV Yu. A.</i> Allowing for the influence of external factors during thermal inspection of pipelines .....	50
<i>GUZ Yu. T.</i> Diagnostics of technical condition of magnetic, mobile-contact and electrical subsystems in electromagnetic systems .....	53
<i>POREV V. A.</i> Compensation of electrode radiation, when studying the temperature field of the melting zone .....	55
<i>BELII N.G., POLONSKY A.YA, BUKHENSY V.N., PAVLII A.V.</i> Experimental studies of STRUCTURICS F8 radiographic film of AGFA-Gewart company .....	57

### NEWS AND INFORMATION

<i>MOZGOVOJ A.V.</i> 9th International Symposium-Exhibition on «Modern Methods and Means of Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics» .....	59
In Ukrainian Society for ND and TD .....	60
Jubilee greetings .....	61
Information .....	62
Abstracts of articles .....	63
ADVERTISING .....	66

### BOARD OF EDITORS

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. Zatselin

### Address:

The E. O. Paton Electric  
Welding Institute  
of the NAS of Ukraine,  
11 Bozhenko str., 03680,  
Kyiv, Ukraine

Tel.: (38044) 261 58 81,  
261 54 03, 269 26 23  
Fax: (38044) 268 04 86

E-mail: journal@paton.kiev.ua  
journal@paton.kiev.ua  
<http://www.nas.gov.ua/pwj>

### Scientific editors

Yu.N.Posypaiko, A.A.Gruzd

Editor G. V. Olshevckay

### Electron galley

N. N. Kravchenko,  
A. I. Sulima, I. V. Petushkov

State Registration Certificate  
KV 4787 of 09.01.2001

Таблица 1. Экспериментальные [3] и соответствующие им расчетные значения  $K_f$

№ п/п	D, мм	t, мм	t <sub>1</sub> /t	L/√Dt	L, мм	σ <sub>в</sub> /σ <sub>т</sub>	K <sub>f расч</sub> <sup>*</sup>	K <sub>f расч</sub> <sup>**</sup>	K <sub>f эксп</sub>
1	762,0	9,8	0,61	2,53	219,2	1,34	0,49	0,40	0,48
2	762,0	9,7	0,61	4,29	369,8	1,34	0,42	0,39	0,42
3	762,0	9,9	0,92	2,57	224,0	1,34	0,09	0,08	0,14
4	762,0	9,5	0,81	2,62	224,0	1,34	0,22	0,19	0,28
5	762,0	9,6	0,61	0,97	83,8	1,34	0,80	0,72	0,78
6	762,0	9,6	0,61	0,97	83,8	1,34	0,81	0,72	0,79
7	762,0	9,2	0,38	4,41	370,8	1,31	0,65	0,62	0,65
8	762,0	9,6	0,41	2,59	222,2	1,31	0,73	0,64	0,68
9	762,0	9,6	0,41	0,97	83,8	1,31	0,93	0,91	0,82
10	762,0	9,8	0,82	4,27	370,8	1,25	0,19	0,18	0,18
11	762,0	9,8	0,81	0,99	86,3	1,25	0,43	0,29	0,66
12	914,4	10,0	0,51	0,88	84,5	1,24	0,88	0,85	0,79
13	914,4	10,1	0,51	1,59	153,1	1,25	0,75	0,65	0,63
14	914,4	11,1	0,61	1,38	139,7	1,41	0,68	0,55	0,63
15	914,4	11,3	0,76	1,37	139,7	1,41	0,43	0,29	0,54
16	914,4	9,7	0,51	2,02	190,5	1,30	0,67	0,56	0,54
17	762,0	9,1	0,51	1,82	152,4	1,30	0,71	0,60	0,64
18	762,0	9,3	0,49	1,81	152,4	1,30	0,74	0,63	0,67
19	762,0	9,4	0,47	1,79	152,4	1,30	0,75	0,65	0,70
20	914,4	9,7	0,52	2,42	228,6	1,27	0,61	0,51	0,43
21	914,4	9,9	0,76	2,23	213,3	1,35	0,31	0,24	0,32
22	914,4	9,9	0,75	1,27	121,9	1,35	0,47	0,33	0,51
23	914,4	10,1	0,50	1,16	111,7	1,33	0,84	0,78	0,65
24	762,0	15,4	0,70	3,74	406,4	1,37	0,33	0,29	0,29
25	762,0	15,6	0,69	3,72	406,4	1,37	0,34	0,31	0,28
26	863,6	12,8	0,25	3,86	406,4	1,32	0,81	0,77	0,68
27	863,6	12,9	0,87	5,76	609,6	1,32	0,13	0,13	0,10
28	863,6	12,9	0,83	5,76	609,6	1,32	0,18	0,17	0,14
29	914,4	10,2	0,49	1,15	11,7	1,33	0,84	0,78	0,66
30	914,4	10,5	0,41	1,67	165,1	1,33	0,82	0,76	0,62
31	914,4	10,2	0,51	1,15	111,7	1,35	0,84	0,78	0,65
32	1066,8	10,2	0,63	1,57	165,1	1,34	0,59	0,45	0,55
33	914,4	9,8	0,69	1,61	152,4	1,25	0,49	0,36	0,42
34	914,4	10,6	0,70	0,64	63,5	1,38	0,78	0,71	0,73
35	914,4	11,1	0,68	1,25	127	1,41	0,62	0,47	0,61

\* Значения определены по формуле (1).  
 \*\* Значения определены по формуле (5).

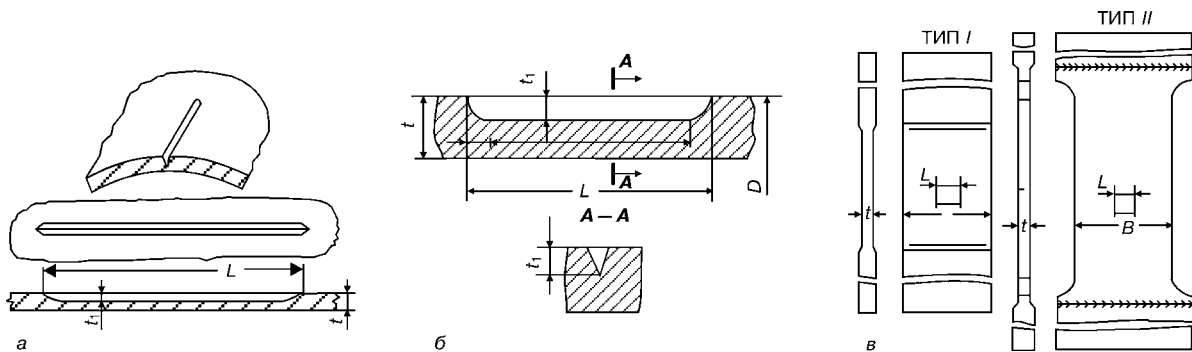


Рис. 1. Искусственные дефекты в трубах и плоские образцы, использованные при проведении испытаний.

Для тонких оболочек в условиях плоского напряженного состояния длина пластической зоны равна

$$2r_y = (1/\pi)(K_f/\sigma_T)^2, \quad (2)$$

где  $\sigma_T$  — предел текучести материала;  $K_f$  — коэффициент интенсивности напряжений. В рассматриваемом случае  $K_f$  по концам модельного дефекта равен

$$K_f = [\sigma - \bar{\sigma}(1 - t_1/t)]M\sqrt{\pi L/2}, \quad (3)$$

где  $\sigma$  — кольцевые напряжения в оболочке;  $\bar{\sigma}$  — напряжения общей текучести перемычки под дефектом.

Некоторая неопределенность, возникающая при оценке значений  $\bar{\sigma}$  и  $\sigma$  на стадии формирования

пластической зоны, устранена в первом приближении следующим образом. Будем считать (в запас прочности), что деформационное упрочнение материала перемычки под дефектом к моменту формирования пластических зон по концам модельного дефекта не получило развития и соответственно  $\bar{\sigma} = \sigma_T$ . С другой стороны, при  $\sigma = \sigma_T$  пластическая область в рамках принятого подхода достигает максимального размера и соответственно отражает зону возмущения упруго-пластических деформаций в условиях глобальной текучести. Это обеспечивает приближение к допущению, сделанному в [1] при выводе формулы (1): напряжения по концам модельной прослойки равны напряжениям в оболочке.

С учетом сказанного, принимая  $\bar{\sigma} = \sigma_T$  и  $\sigma = \sigma_T$ , получаем скорректированную расчетную длину модельного дефекта

$$L_p = L [1 + 0,5(t_i/t)^2 M^2]. \quad (4)$$

Тогда коэффициент ослабления цилиндрической оболочки трещиноподобным поверхностным дефектом равен

$$K_f = \sigma_c/\sigma_b = 1 - (t_i/t) [Z/(1+Z)], \quad (5)$$

где  $Z = \frac{\alpha L_p M_p^2}{2t(1 - t_i/t)^2}$ .

Здесь  $M_p = \sqrt{1 + 0,8 (L_p/\sqrt{Dt})^2}$  – скорректированная поправка Фолиаба.

Следует ожидать, что такой подход будет давать несколько заниженные результаты при небольших значениях  $K_f$ , когда разрушающие напряжения значительно ниже предела текучести. Вместе с тем в диапазоне значений  $K_f$ , представляющих интерес в практическом отношении, эта простейшая поправка на пластичность, как будет показано, обеспечивает приемлемые результаты.

С учетом сказанного целесообразно перейти к рассмотрению результатов экспериментальной проверки зависимости (5). Для этой цели были привлечены экспериментальные данные других авторов [3–5].

В работе [3] искусственные концентраторы напряжений в виде узких поверхностных надразов имитировали трещиноподобные дефекты, ориентированные в осевом направлении труб (рис. 1, а). Основные характеристики дефектов и труб приведены в табл. 1. В нее не включены результаты испытаний некондиционных труб, для металла которых отсутствуют значения ударной вязкости.

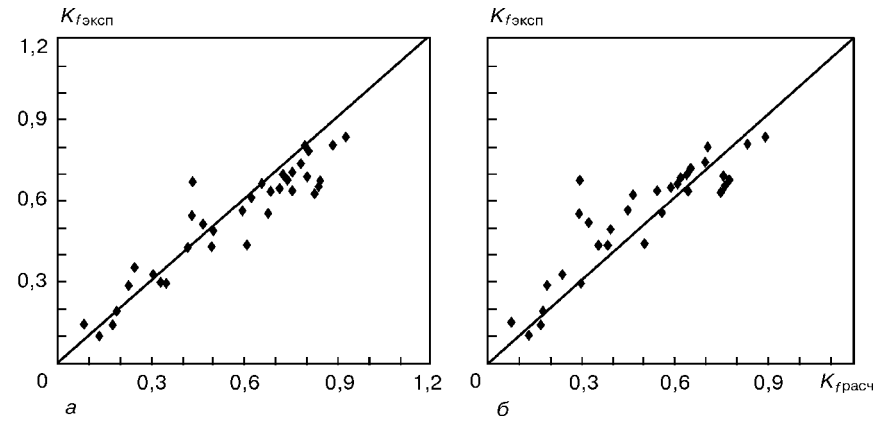


Рис. 2. Сопоставление экспериментальных значений  $K_f$  и рассчитанных: а – по формуле (1) при  $\omega = 0$ ; б – по формуле (5).

Сопоставление экспериментальных значений  $K_f$  и рассчитанных по формуле (1) при  $\omega = 0$  и зависимости (5) показывает, что поправка на пластичность приводит к ожидаемым позитивным результатам (рис. 2, табл. 1).

Наибольшие погрешности в случае применения формулы (1), как и следовало ожидать, наблюдаются при высоких уровнях разрушающих напряжений и соответственно развитых пластических зонах. В этой области формула (5) обеспечивает приемлемую корректировку значений  $K_f$  (рис. 2).

Дополнительно для проверки формул (1), (5) использовались экспериментальные результаты из работы [4]. Эти данные относятся к современным трубным сталям, отличающимся по механическим свойствам и, в частности, по отношению  $\sigma_b/\sigma_T$ . Кроме того, основные расчетные параметры труб, включая толщину стенки  $t$ , имеют значительные различия, что существенно для экспериментальной проверки полученных формул. Ее результаты приведены на рис. 3 и в табл. 2.

В целом соотношение между расчетными и экспериментальными значениями  $K_f$  в данном случае носит несколько иной характер. Формула (1) обеспечивает консервативную оценку  $K_f$  за исключением результатов нескольких испытаний. Корректировка расчетной длины дефекта в соответствии с формулой (5) устраняет это несоответствие при некотором дополнительном занижении остальных

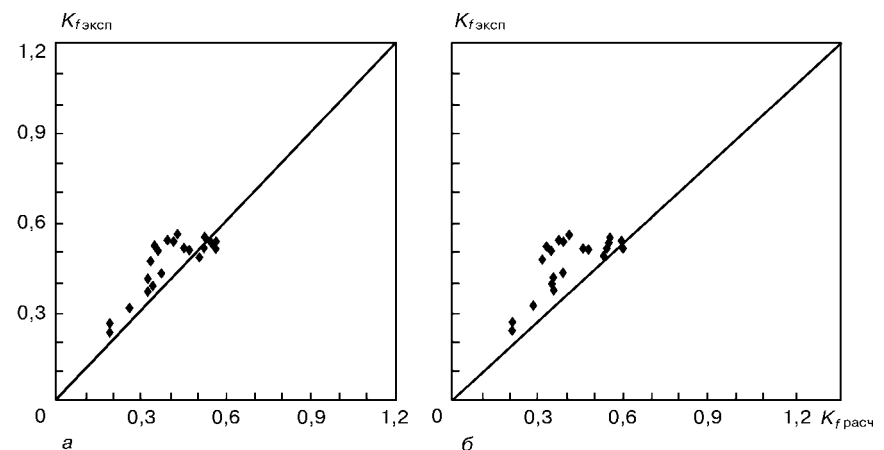


Рис. 3. Сопоставление экспериментальных и рассчитанных значений  $K_f$ : а – по формуле (1) при  $\omega = 0$ ; б – по формуле (5).



**Таблица 2. Экспериментальные [4] и соответствующие им расчетные значения  $K_f$**

№ п/п	Марка стали	$D$ , мм	$t$ , мм	$t_1/t$	$L/\sqrt{Dt}$	$L$ , мм	$\sigma_b/\sigma_t$	$K_{f\text{расч}}^*$	$K_{f\text{расч}}^{**}$	$K_{f\text{экс}}$
1	Сталь 10	325	8	0,68	5,57	284,4	1,81	0,32	0,31	0,37
2	Сталь 10	325	8	0,75	5,61	286	1,81	0,26	0,25	0,32
3	Сталь 10	325	8	0,81	5,63	287,4	1,63	0,19	0,18	0,23
4	Сталь 10	325	8	0,68	5,57	284,4	1,63	0,32	0,31	0,41
5	Сталь 10	325	8	0,81	5,63	287,4	1,41	0,19	0,18	0,23
6	Сталь 10	325	8	0,75	5,61	286	1,41	0,26	0,25	0,31
7	Сталь 10	325	8	0,68	5,57	284,4	1,41	0,32	0,31	0,37
8	Сталь 10	325	8	0,81	5,63	287,4	1,41	0,19	0,18	0,26
9	13Г1С	1220	12	0,54	2,79	337,4	1,35	0,55	0,47	0,52
10	X70	1420	16,5	0,65	2,59	397,6	1,35	0,43	0,35	0,55
11	X70	1420	16,5	0,71	2,61	399,6	1,35	0,36	0,29	0,51
12	10Г2БТ	1420	15,7	0,52	3,63	542	1,26	0,52	0,47	0,51
13	10Г2Ф	1420	17,5	0,67	2,53	399,8	1,26	0,41	0,33	0,53
14	09Г2ФБТ	1420	17,5	0,72	2,54	401,2	1,25	0,35	0,28	0,52
15	08Г2БТ	1220	13,4	0,69	3,47	444,4	1,25	0,34	0,31	0,38
16	09Г2БТ	1420	16,8	0,58	3,53	545,2	1,23	0,46	0,42	0,50
17	10Г2Ф	1420	17,5	0,68	2,54	400,2	1,22	0,39	0,32	0,53
18	08Г2ФБТ	1420	14,5	0,52	3,76	540	1,22	0,53	0,48	0,54
19	09Г2ФБТ	1420	17,5	0,73	2,54	401,6	1,22	0,33	0,27	0,47
20	08Г2ФБТ	1420	15,7	0,54	3,63	542,6	1,22	0,51	0,46	0,48
21	X60	720	10,3	0,66	3,93	338,2	1,20	0,37	0,34	0,43
22	X70	1420	16	0,6	3,28	495,2	1,17	0,45	0,40	0,51
23	10Г2БТ	1420	15	0,48	3,69	539,6	1,14	0,56	0,52	0,51
24	10Г2БТ	1420	15	0,48	3,69	539,6	1,14	0,56	0,52	0,53

\*, \*\* Обозначения соответствуют принятым в табл. 1.

**Таблица 3. Экспериментальные [5] и соответствующие им расчетные значения  $K_f$**

№ п/п	$t$ , мм	$t_1$ , мм	$L/B$	$L$ , мм	$L/t$	$\sigma_b/\sigma_t$	$K_{f\text{расч}}^*$	$K_{f\text{расч}}^{**}$	$K_{f\text{экс}}$
1	10	6,9	0,23	27,4	2,74	1,296	0,91	0,89	0,77
2	10	8,0	0,17	20	2,00	1,296	0,84	0,80	0,78
3	20	13,6	0,15	44	2,20	1,296	0,93	0,92	0,88

\*, \*\* Обозначения соответствуют принятым в табл. 1.

значений  $K_f$ . Общий вывод, вытекающий из рассмотренных экспериментов и отвечающий цели этой статьи, заключается в том, что зависимость (5) удовлетворительно отражает влияние на прочность поверхностных трещиноподобных дефектов в тон-

костенных оболочках, нагруженных внутренним давлением.

Другой аспект, заслуживающий рассмотрения, относится к проверке возможности использования зависимости (5) для оценки дефектостойкости плоских конструктивных элементов ( $D \rightarrow \infty$ ). Как отмечалось [1], некоторые расчетные методы определения  $K_f$  приводят к неожиданному результату: дефекты не влияют на прочность плоских конструктивных элементов. Развиваемый здесь подход не подтверждает этот парадоксальный вывод. В случае плоских конструктивных элементов поправка Фолиаса равна 1 и соответственно  $K_f$  зависит только от относительной глубины  $t_1/t$  и длины  $L/t$  дефекта. В целом это приводит к существенному повышению трещиностойкости, но не исключает снижения прочности. Для экспериментальной проверки этого заключения использованы результаты работы [5]. Испытанию на растяжение подвергались пластины с поверхностными дефектами в виде электроэрозсионных надрезов, оканчивавшихся усталостными трещинами (рис. 1, в). Поскольку формулы (1) и (5) не учитывают влияние конечной ширины пласти-

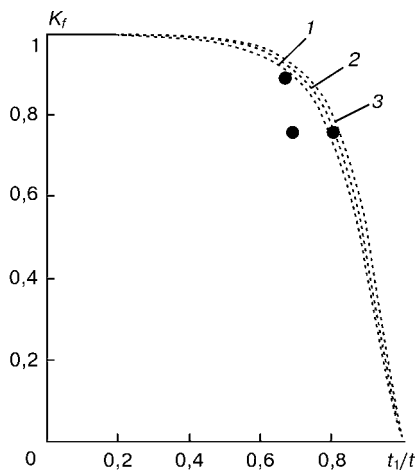


Рис. 4. Зависимость  $K_f$  от относительной глубины  $t_1/t$  и длины дефекта  $L/t$ : • — экспериментальные данные; 1–3 — рассчитанные по формуле (5).

ны  $B$ , были отобраны результаты испытаний образцов с относительно небольшими значениями  $L/B$  [5], у которых разрыв перемычки под дефектом происходил до достижения максимальной нагрузки. Сопоставление результатов расчета по формулам (1), (5) с экспериментальными данными приведены в табл. 3 и на рис. 4.

Как видно, согласование теоретических и экспериментальных значений  $K_f$  вполне удовлетворительное, особенно если принять во внимание некоторое влияние конечной ширины пластины. Итоговый график (рис. 5), где нанесены все рассмотренные результаты, показывает, что использование значения  $\alpha = 0,04$  вместо теоретического значения  $\alpha = 0,01$  обеспечивает консервативную оценку трещиностойкости, необходимую для практических целей.

Следует отметить, что завышенные экспериментальные значения  $K_f$  нередко бывают связаны с наличием структурной текстуры металлопроката и соответственно склонностью к слоистому растрескиванию, препятствующему развитию вязкой трещины перпендикулярно поверхности конструктивного элемента.

Общий вывод, вытекающий из приведенных данных, заключается в том, что предлагаемая модель [1] и соответствующая ей расчетная схема в общих чертах правильно отражают физико-механические особенности ситуации в зоне несплошности. Поверхностный дефект и пластическая зона вокруг него после наступления общей текучести перемычки под дефектом начинают воспринимать нагрузку как единое целое, что и определяет основные особенности деформирования и разрушения.

Эти представления могут быть использованы и при вязких или квазивязких состояниях матери-

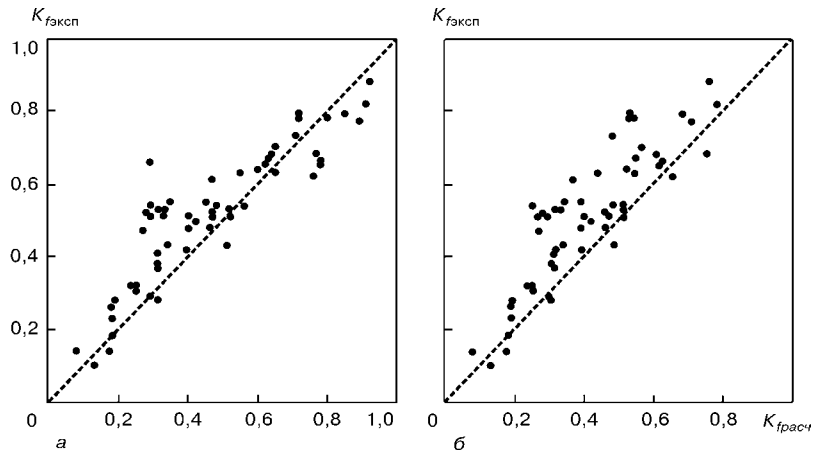


Рис. 5. Результаты соотношения экспериментальных значений  $K_f$  и рассчитанных по формуле (5) при  $\alpha = 0,01$  (а);  $0,04$  (б).

ала, характеризующихся относительно низкими показателями трещиностойкости. При этом деформационная характеристика трещиностойкости В. В. Панасюка — критическое раскрытие трещины ( $\delta_i$  и  $\delta_{ic}$ ) — наиболее ясно отражает условия инициирования разрушения от трещиноподобных дефектов. Этот и другие вопросы будут рассмотрены в последующих публикациях.

1. В. С. Гуренко, В. В. Мутас, С. В. Гуренко. Прочность трубопроводов и сосудов с коррозионными выемками // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2000. — № 3. — С. 10–17.
2. Irwin G. R. 7th Sagamore Ordnance: Mater. Res. conf. — Syracuse: Syracuse University Press, N.Y., 1961. — Vol. 4.
3. Failure stress levels of flaws in pressurized cylinders / J. F. Kiefner, W. A. Maxey, R. J. Eiber, A. R. Duffy // American Society for Testing and Materials, 1973.
4. Применение модели вязкого разрушения труб осевыми дефектами для анализа результатов натуральных экспериментов / И. В. Орыняк, С. В. Ляшенко, В. М. Торон, В. Н. Горницкий // Пробл. прочности. — 1996. — № 6.
5. D. Munz, S. Muller. Failure of components with surface cracks of the containment steel 15MnNi63 // The Intern. J. of Pressure Vessels and Piping. — 1987. — 30, № 2.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона,  
Диагностич. предприятие «Тест»,  
Киев

Поступила в редакцию  
12.07.2001

# КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И РЕНТГЕНОВСКАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

А. Э. КАПУСТИН, И. И. БАРДУСОВА, В. В. КОЛОСОВ

Одно из направлений рентгеновского и гаммаграфического методов диагностики — проведение анализа рентгеновских и гаммаграфических (РГГ) снимков сварных соединений. Дефектоскопист методом визуального анализа снимков идентифицирует типы дефектов и оценивает их линейные размеры и глубинные параметры. На основании нормативных документов делается заключение о годности либо негодности сварного соединения. Качество расшифровки снимков дефектоскопистами всегда носит достаточно субъективный характер. Сказываются такие факторы, как уровень подготовки дефектоскописта, его самочувствие (усталость, острота зрения и т. д.), предел возможности оценки количества снимков, а также качество изображения полученных снимков (размытые границы, плохая контрастность, слабая выделяемость изображения дефекта по отношению к общему фону и др.). Оценка качества сварных соединений также требует выполнения определенного комплекса мероприятий метрологического и расчетно-аналитического характера, которые трудно реализуемы из-за отсутствия инструментов для проведения данных работ. Очевидно, что качество проведения дефектоскопии сварных соединений в огромной степени зависит от уровня подготовки и навыков специалистов в данной области.

Предлагаем возможный вариант реализации компьютерных технологий в области РГГ дефектоскопии сварных соединений как один из способов разрешения вышеуказанных проблем.

**Распознавание и анализ дефектов сварных соединений по их РГГ снимкам.** Накопленный опыт в рамках разработок компьютерной расшифровки РГГ снимков показывает, что технологию распознавания и анализа дефектов определяют следующие позиции [1]:

ввод изображения РГГ снимка и сопроводительной информации в компьютер;

создание блока программ предварительного анализа изображения и его пригодности к возможной дальнейшей компьютерной обработке;

создание блока программ поиска и выделения контуров дефектов, идентификации их типов и определения их геометрических характеристик;

создание расчетно-аналитического блока для получения заключения по дефектности сварного соединения;

статистическая обработка получаемых результатов; создание вспомогательных сервисных функций.

Выполнение требований соответствия значений оптической плотности получаемых снимков указанным в существующих стандартах является обязательным как для стандартной процедуры по расшифровке снимков, так и для компьютерной.

Ввод РГГ снимка в компьютер и получаемое качество изображения определяются техническими возможностями имеющегося оборудования. В результате формируется компьютерное изображение снимка, которое вместе с сопровождающей его информацией заносится в базу данных.

Отправным пунктом начала обработки изображения снимка является анализ калибровочного эталона чувствительности. Применяемые на практике эталоны имеют множество типов [2] — к каждому из них требуется индивидуальный подход при обработке изображения.

Предлагается к рассмотрению в качестве примера эталон канавочного типа как наиболее распространенный при РГГ контроле в странах СНГ. Его изображение по ГОСТ 7512 представлено на рис. 1, а размеры — в таблице.

На рис. 2 приведено компьютерное построение горизонтальных проекций калибровочных эталонов, которые далеко не соответствуют их изображению по указанному выше ГОСТу, что и дает повод к определенным размышлениям. Возможности компьютерной обработки изображений, с одной стороны, помогают в решении задачи калибровки снимка и определении его чувствительности, а с другой — ставят ряд вопросов по тому, как и что видит специалист, оценивая эталон.

Как видно из рис. 2, визуально очень трудно судить о достоверности информации, предоставляемой эталоном, тем более потом делать какую-то оценку дефектов по снимку. Оперативно решить такую проблему без вычислительной техники с соответствующей программной обработкой практически невозможно.

Калибровку снимка можно провести путем «указания» программному модулю по изображению эталона его крайних угловых точек. Далее идет непосредственно обработка изображения самого эталона. Вначале сглаживаются шумы изображения. Для этого используется сглаживающий фильтр с апертурой «два», описываемый формулой

$$I_{xy} = \sum_{i=-f}^f \sum_{j=-f}^f \frac{I(x-i)(y-j)}{(f+1)^2},$$

где  $I_{xy}$  — уровень серого в данной точке;  $x, y$  — координаты, пикс.;  $f$  — апертура фильтра.

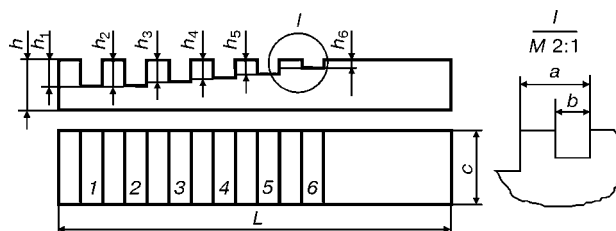


Рис. 1. Канавочный эталон по ГОСТ 7512 (1–6 — канавки).

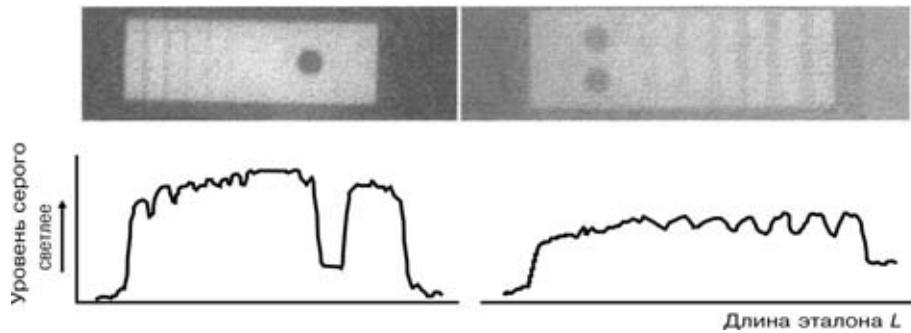


Рис. 2. Компьютерное построение канавочного эталона «в разрезе» по уровню серого на рентгеновском снимке.

Затем по данным уровня перепадов серого эталона строится его изображение в горизонтальной проекции и делается статистически вероятностный расчет наиболее представленного ряда значений уровня серого поверхности эталона. Разница между уровнем серого основного фона металла и значением наиболее представленного уровня серого эталона дает базовое значение для построения эталона, который должен был получиться на снимке. Рис. 3 дает наглядное представление о полученном расчетном эталоне, наложенном на компьютерное построение изображения эталона. Если принудительно установить на этом снимке расчетный уровень фона по эталону, то очевидно, что самую последнюю канавку не будет видно. Как показывает практика, отклонения расчетных значений уровней серого от воспринимаемых глазами наблюдается на большинстве снимков. Наложенный таким методом расчетный эталон всегда будет находиться в средних пределах относительной ошибки имеющегося на снимке изображения.

Исходя из истинных размеров и самого изображения эталона на РГГ снимке и учитывая распределение уровня серого по данному эталону, можно сделать вывод о достоверности информации, на основании которой делает оценку снимка дефектоскопист [4].

Чувствительность снимка может быть определена программой как наименьшая глубина выявляемой на снимке канавки по указанной продольной осевой линии и рассчитана согласно ГОСТ 7512. Из рис. 3 видно, что фактический уровень серого канавки, по которой оценивается чувствительность снимка, лежит вне зоны расчетного распределения уровня поверхности эталона. Получается, что чувствительность снимка дефектоскопист определяет по канавке эталона, которая часто находится в зоне наибольшей относительной погрешности фактического значения серого по эталону (рис. 4). Поэтому можно утверждать, что определение чувствительности снимка дефектоскопистом по ГОСТ 7512 может быть ошибочным. При проведении программного анализа изображения можно выделить наимень-

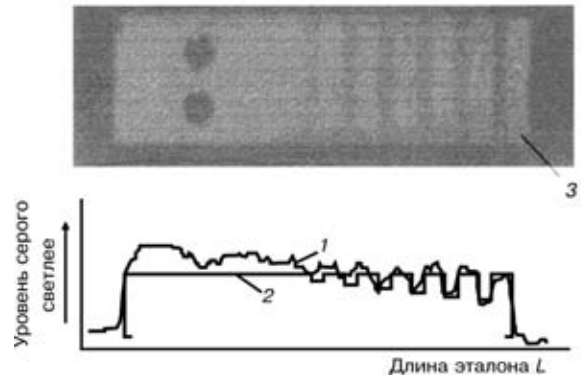


Рис. 3. Фактическое (1) и расчетное (2) распределение уровней серого по эталону 3.

шую канавку эталона, лежащую в зоне расчетного уровня серого эталона. Такое определение чувствительности снимка дает наиболее правильный результат. Канавка 6 на рис. 4 не просматривается, а фактическая видимая канавка 5 (B) не расположена в зоне расчетного отображения канавки 5 (A). Видимая и расчетная канавки 4 (C) имеют общую совмещенную зону, поэтому расчет чувствительности можно проводить по 4-й канавке.

Имея исходные данные яркостей точек эталона и данные анализа для построения расчетного эталона, можно смоделировать изображение эталона, которое должно быть отражено на снимке. Варианты такого моделирования представлены на рис. 5.

Возникает проблема — смоделированная область поверхности эталона в зоне первой канавки «светлее» поверхности эталона в зоне последней канавки (рис. 5). Это достаточно яркий пример, того, что наше восприятие изображения не совсем соответствует отображению на снимке. Анализ уровня серого восстановленной поверхности эталона показывает, что он везде одинаков. В данной ситуации действует психофизиологический закон Вебера–Фехнера, согласно которому различие в зрительных ощущениях при рассматривании двух поверхностей с различной яркостью прямо пропор-

**Размеры канавочного эталона, мм**

Номер эталона	Глубина канавок						a	b	C	h	L
	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_4$	$h_5$	$h_6$					
1	0,60	0,50	0,40	0,30	0,20	0,10	2,5	0,5	10	2	30
2	1,75	1,50	1,25	1,00	0,75	0,50	4,0	1,5	12	4	45
3	—	—	3,00	2,50	2,00	1,50	6,0	3,0	14	6	60

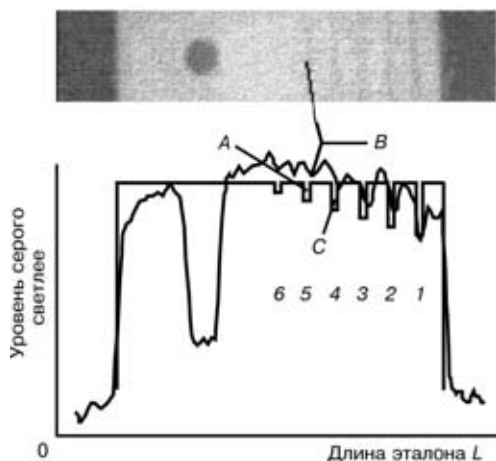


Рис. 4. Уточнение чувствительности по эталону.

ционально контрасту яркостей этих поверхностей [5]. На наше восприятие сильно влияет отображение уровней серого канавок эталона, окружающий фон основного металла на снимке и острота зрения. Так что же мы видим и что оцениваем по эталону? Как учесть психофизиологический закон Вебера-Фехнера при выделении дефектов на изображении сварного шва? На разрешении этих вопросов мы остановимся позже.

Имея в качестве анализатора компьютер с соответствующим программным обеспечением, дефектоскопист может на совершенно ином уровне проводить оценку сварных соединений: не «на глазок», а с конкретными данными уровней серого в любой точке снимка, оперативной информацией чувствительности, масштаба  $X/Y$ , коэффициента пересчета глубины  $Z$ , относительной погрешности и расчетного изображения части эталона на экране монитора. В качестве сервиса можно запросить распределение колебаний уровня фона основного металла, построить 3D изображение реального и исходного эталонов или график, дающий представление о распределении уровня серого по канавкам эталона, а также оперативно получать данные об уровне серого в любой точке снимка и его соответствие

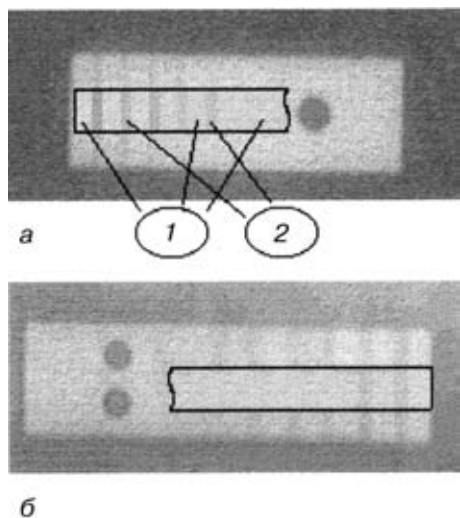


Рис. 5. Эталоны (а, б) и построенная на них расчетная часть изображения (зона 1 имеет одинаковый уровень серого расчетной поверхности; зона 2 — канавки эталона).

номеру канавки эталона. Необходимо отметить, что снимки, по которым проводился анализ, сделаны на пленках отечественного производства. Зарубежные пленки дают несколько лучшие результаты, но проблема искажений не становится от этого менее актуальной.

На рис. 6 представлен вариант работы интерактивного программного анализатора. Имея снимок, пригодный к дальнейшей компьютерной обработке, можно осуществить переход к компьютерному поиску и анализу дефектов. Создавая блок программ поиска и выделения контуров дефектов, мы исходили из того, что дефектоскопист должен самостоятельно определять на снимке участок сварного шва с прилегающей к нему околошовной зоной. Созданные алгоритмы анализа, поиска и описания контуров дефектов представляют собой наиболее сложный комплекс программных модулей, потому что здесь имеется очень много противоречий между получаемыми данными по сварному шву и визуальным наблюдением в нем дефектов, где накладывает свой отпечаток дифференциальный параллакс зрения, конвергенция и аккомодация глаз и где в полной мере работает вышеуказанный закон зрительного восприятия Вебера-Фехнера, сказываются эффекты Пуркинье [6], а также дефекты самой пленки (зернистость, царапины, разводы и многое другое).

Исследование яркостных характеристик рентгеновских снимков, полученных на промышленных предприятиях, показало, что однородный при субъективном восприятии фон (площадью  $1\text{ см}^2$ ) основного металла снимков воспринимается компьютером как совокупность различных уровней серого, диапазон градаций которого составляет 6... 14 % от всего диапазона значений уровня серого цветовой палитры. На «однородном» участке большей площади диапазон колебания градаций серого может составлять 20... 30 % диапазона палитры. При таком разбросе градаций серого применение высокочастотных фильтров выделения контуров для поиска границ сварного шва и дефектов не дает положительных результатов. Применение низкочастотных фильтров приводит к размыванию границ и потере информативности изображения. Для решения этой проблемы были разработаны собственные алгоритмы распознавания.

Алгоритмы поиска сварного шва построены на логическом анализе сгруппированных по яркостному признаку характеристик близлежащих точек выделенного фрагмента снимка. При таком подходе возможно определение границ шва, которые зачастую могут сливаться с фоном основного металла. Для поиска дефектов разработано несколько различных алгоритмов. Сопоставление результатов их работы дает возможность определить местоположение дефекта в матрице выбранного фрагмента снимка. Контуров найденных дефектов описываются по принципу цепочного кодирования. Размытость изображений и отсутствие четких границ приводит к необходимости расчета наиболее вероятностных границ найденных дефектов.

Из всего многообразия найденных объектов дефектами считаются те, которые удовлетворяют следующим критериям:

площадь дефекта и перепад яркости внутри дефекта должны превышать порог поиска, рассчитанный исходя из зернистости фона снимка;

минимальный выявляемый размер дефекта должен быть равен или превышать размер, устанавливаемый нормативными требованиями стандартов;

найденный дефект должен иметь положительный коэффициент зрительного восприятия.

Теперь о том, как быть с «эффектами» нашего зрения, о которых уже говорилось ранее. Возможно, специалистам в области анализа изображений приходилось сталкиваться с проблемой, когда обрисованный программой контур (в нашем случае дефект) на изображении не виден глазами. В рамках проведенных исследований и на основе статистического анализа полученных данных для разработанной системы была выведена формула для получения порога зрительного восприятия дефекта. В общем случае коэффициент зрительного восприятия  $K_r$  имеет вид:

$$K_r = K_{v-f} \left| \frac{1}{D} \left( \frac{D}{2} - H_0 \right) \right| \left( 1 - \frac{0,5 S_d}{H_{sr,p}} \right) + K_s,$$

где  $K_{v-f}$  — значение коэффициента Вебера–Фехнера;  $D$  — максимальное количество градаций серого установленной цветовой палитры;  $H_0$  — яркость фона окружения дефекта;  $S_d$  — интегральная площадь дефекта;  $H_{sr,p}$  — перепад видимости;  $K_s$  — поправочный коэффициент, зависящий от фона снимка.

Как показала опытная эксплуатация программ, достоверность отбора по коэффициенту зрительного восприятия, рассчитанному по приведенной формуле, составляет 75... 80 %. Расчет по более сложной методике повышает достоверность до 90 %. Значения коэффициента зрительного восприятия  $K_r$  позволяют дефектоскописту оценить достоверность описанного контура как дефекта при низком контрасте площадей контура и окружения.

Программный поиск и выделение дефектов предоставляют возможность детального изучения каждого описанного дефекта. Для этого на выделенную область поиска накладывается координатная сетка, и дефекты «маркируются» согласно их начальным значениям координат. Значения полученных параметров дефекта отображаются в специальном информационном окне. Если требуется вмешательство оператора в настройку системы поиска дефектов, то для этого можно в определенных пределах изменять результирующий коэффициент порога поиска. Дополнительные сервисные функции позволяют увеличить размер изображения выбранного дефекта, «посмотреть» его по осей  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ . Можно построить 3D

изображение дефекта при его условно симметричном расположении по глубине (оси  $Z$ ). По отдельному заказу возможна индикация специальных параметров — таких, как коэффициент Вебера–Фехнера, расчетный коэффициент зрительного восприятия, средняя яркость дефекта и его окружения, перепад яркости в дефекте и видимости, порог поиска дефектов. На рис. 7 представлены варианты результатов индикации данных по выбираемым дефектам.

При разработке универсального программного обеспечения возникают трудности из-за широкого диапазона контрастности снимков — от четких до практически однотонных. Тем не менее мы имеем определенные результаты по созданию программ для выявления дефектов на таких снимках, несмотря на различие их яркостных характеристик.

Определение линейных и глубинных размеров найденных дефектов, их площадей, периметров, местоположения, а также линейных характеристик самого сварного шва не представляет большой сложности. Переход от пиксельных размеров к действительным в миллиметрах производится путем пересчета по полученным ранее калибровочным коэффициентам.

Еще одна проблема — это идентификация типов найденных дефектов. Простой дефект, например, в виде одиночной круглой поры в растровом формате, представляет собой фигуру, в лучшем случае близкую к прямоугольнику. Более сложные одиночные дефекты описываются многоугольниками произвольной конфигурации. Непровар, воспринимаемый дефектоскопистом как протяженный непрерывный объект, может быть выявлен компьютером как совокупность объектов с промежутками. Если имеются скопления пор или шлаков, то, накладываясь друг на друга в плоском изображении, они дают результирующий объект очень сложной геометрической формы.

Программа путем логического анализа характерных признаков дефектов и их локализации в сварном шве с применением методов выделения

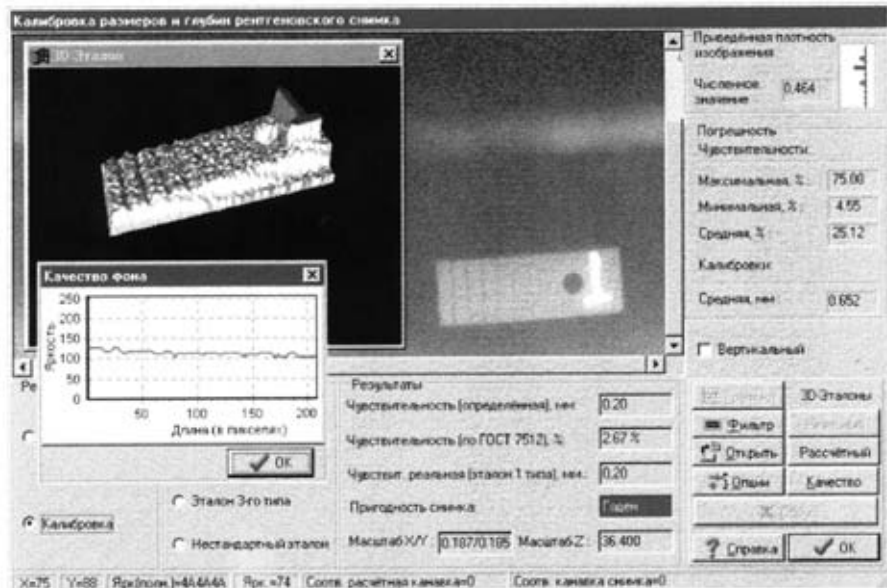


Рис. 6. Интерактивный программный анализатор.

более простых дефектов из сложных идентифицирует с определенной долей вероятности такие дефекты, как пора, шлак, скопление пор и шлаков, непровар, трещина. Однако окончательное решение по идентификации типа дефекта мы оставляем за оператором. Дефектоскопист в интерактивном режиме может изменить тип найденного компьютером дефекта или вообще убрать обнаруженный дефект из перечня дефектов, по которому делается заключение о качестве сварного соединения, если он считает, что это дефект не сварного шва, а пленки. Однако в базе данных все равно будет храниться первоначальная картина найденных компьютером дефектов. На рис. 8 показаны результаты распознавания и анализа дефектов.

Полученная таким способом информация о дефектах переносится в распределенную базу данных

дефектов сварных соединений и является исходной для оценки качества сварного соединения путем сравнения размеров дефектов с допустимыми значениями по нормативным документам [7].

Выбор нормативных документов, данные из которых должны использоваться для оценки дефектов, является проблемой неоднозначной. Можно ввести в компьютер практически все документы, используемые в различных отраслях промышленности, и оператор смог бы выбирать любой. Однако, как показывает опыт, в каждой конкретной организации используется довольно ограниченный набор нормативных документов. Поэтому планируется предусмотреть создание гибкого аппарата для ориентации системы на потребителя по нормативной документации.

При оценке качества сварных соединений необходимо проведение статистического анализа, с помощью которого можно оценить влияние различных причин, приводящих к возникновению дефектов. Для определения весовых коэффициентов каждой причины используется метод дискриминантного анализа. По полученным весовым функциям для каждой причины дефектности можно оценивать сварные соединения как по отдельности, так и выборками. На основании имеющихся результатов оценки можно говорить о технологическом несоответствии каких-либо элементов в сварочном процессе на данном объекте или в организации. На рис. 9 представлен пример, отражающий уровень дефектности у бригады сварщиков на объекте.

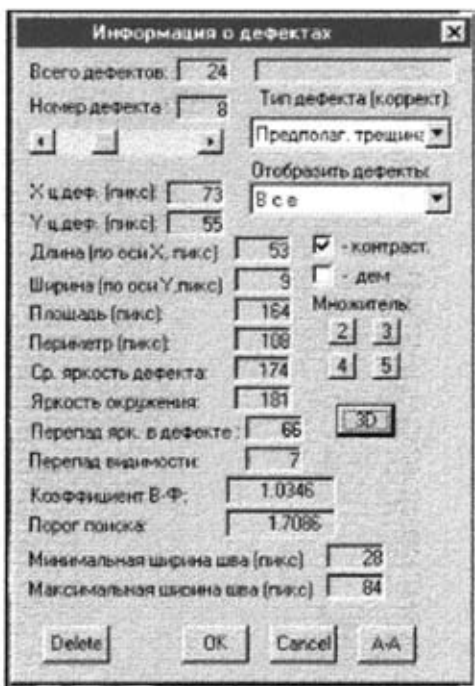
Сотрудничество разработчиков с лабораториями по неразрушающему контролю Мозырского нефтеперерабатывающего завода и Открытого акционерного общества «Белгазстрой» дало возможность значительно продвинуться вперед в решении проблем по представленной технологии. Сравнение предварительных результатов независимого тестирования системы с результатами оценки снимков дефектоскопистами показали, что машина переоценивает размерность дефектов примерно на 15...20 %. Человек недооценивает размер на 10...15 %, особенно на дефектах малой площади: чем они меньше, тем больше ошибка. Программу можно подправить, даже если она «перестраховалась». А как быть с дефектоскопистом? Недооценка может привести к серьезным последствиям, а «подправить» специалиста нельзя. Однозначных ответов на поставленные в данной статье вопросы нет, но использование подобных технологий должно помочь уменьшить влияние человеческого фактора при расшифровке РГГ снимков.

Как показывает практика, данная разработка на международных конференциях и выставках вызывает интерес не только среди дефектоскопистов, но и как экспертная система у специалистов в области оценки систем качества.

**Обучающий комплекс с оценкой профессиональной пригодности для подготовки специалистов по дефектоскопии рентгеновского и гаммаграфического контроля.** Применение современных средств вычислительной техники в области дефектоскопии видится не только как создание инструмента, позволяющего автоматизировать труд де-



а



б

Рис. 7. Отображение данных по дефектам: а — стандартный вариант индикации; б — вариант под заказ.

фектоскописта. Представление данной разработки в области компьютерных технологий являются закономерным следствием, вытекающим из системы компьютерного анализа дефектов сварных соединений.

Уровень качества сварных соединений и подготовка специалистов по дефектоскопии имеют непосредственную связь между собой. Поэтому подготовка и переподготовка высококвалифицированных специалистов по дефектоскопии является важным направлением в системе управления качеством продукции в сварочном производстве.

Естественно, такой комплекс должен иметь адаптивность к существующей системе подготовки и аттестации специалистов по дефектоскопии РГГ контроля в рамках требований национальных и международных стандартов. В Республике Беларусь стандарт СТБ ЕН 473-95 (точный аналог EN 437:1992) является нормативной документацией, устанавливающей требования к квалификации персонала, осуществляющего неразрушающий контроль.

Количество информации для усвоения знаний и получения навыков достаточно велико, причем она в большинстве своем является труднодоступной и разобранной. Справочники, где сосредоточены данные по каждому разделу, относятся к специальным видам технической и научной литературы. Использование компьютерных баз данных (БД) дает определенный ряд преимуществ: БД может содержать в полном объеме всю требуемую информацию, которая может храниться сколь угодно долго. Количество и содержание этой информации можно изменить в любой момент без особых усилий и затрат.

Кроме теоретических навыков дефектоскопист после обучения должен уметь на практике настраивать оборудование, составлять технологические карты на просвечивание и расшифровывать рентгенограммы, что достигается обширной тренировкой. Для приобретения навыков в обращении с оборудованием необходим непосредственный контакт с ним. Что же касается других навыков, то здесь очевидны возможности вычислительной техники в совершенствовании процесса их приобретения. Эмулирование процесса составления технологического контроля с возможностью оперативного доступа к справочной информации из БД делает его менее трудоемким и более регулярным. Наиболее ответственными этапами при проведении контроля является расшифровка и идентификация дефектов на рентгеновской пленке. Этому вопросу при разработке обучающего комплекса уделено особое внимание. При этом учтен весь опыт работы в процессе

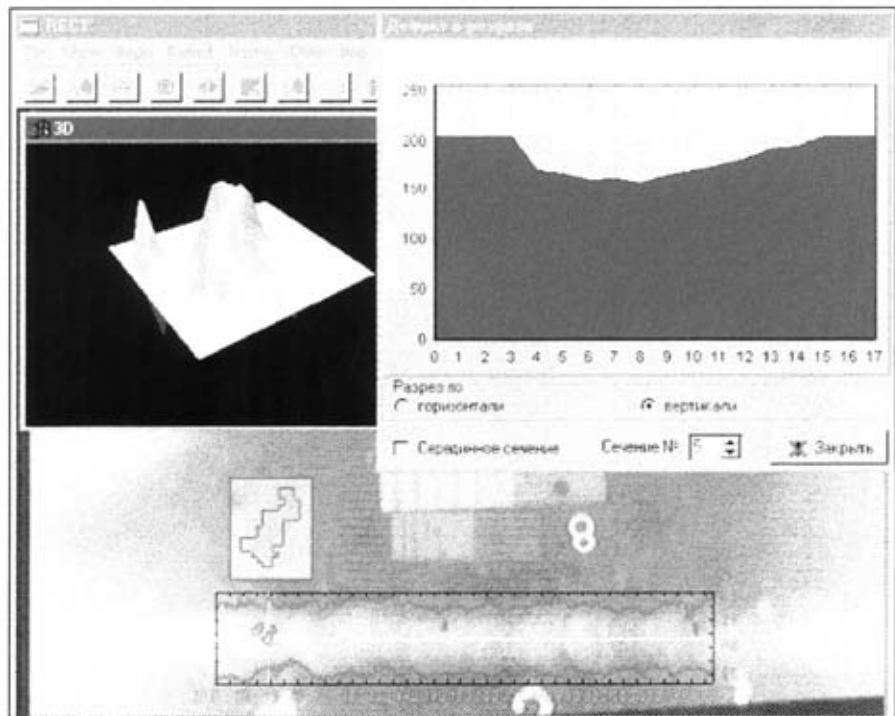


Рис. 8. Построение сечения по вертикали и условно симметричное 3D изображение выбранного дефекта.

создания системы распознавания и анализа дефектов сварных соединений.

Ранее мы останавливались на том, что дефектоскопистам свойственно ошибаться при определении как типов дефектов, так и их размеров. Однако у опытных дефектоскопистов процент ошибки значительно меньше. Сказывается большой опыт работы и тренировка. В состав комплекса введена программа-тренажер для тренировки при обучении. Есть также и специальная программа, имитирующая процесс расшифровки снимков.

Базы данных содержат информацию о радиационных методах в дефектоскопии и предназначенны для оперативного поиска необходимых характеристик оборудования, материалов, нормативно-справочных данных и т. д. В систему также включены таблицы с тестовыми вопросами и вариантами ответов для проведения контрольных проверок ус-

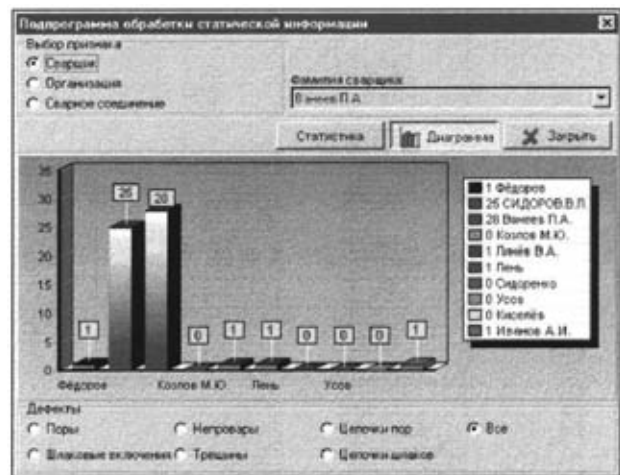


Рис. 9. Статистический анализ: уровень дефектности по сварщикам.





Рис. 10. Фрагменты из программы обучающего комплекса.

воения материала по каждому из разделов и для общего экзамена в целом. В базе данных «РГГ снимки» содержатся изображения РГГ снимков с типовыми дефектами, образцами эталонов и снимков для тестирования. База данных «Учащиеся» содержит полную информацию о лицах, прошедших или прошедших обучение, а также результаты проведения экзаменов.

Содержание информации в электронном виде позволит упростить как учащимся, так и преподавателям доступ к необходимым данным, что наряду с возможностью постоянно пополнять, изменять содержимое БД является значительным преимуществом по сравнению с нынешними носителями информации (справочники, учебники). Расширенные возможности тренажеров позволят экономить время и материальные ресурсы на получение необходимых практических навыков дефектоскопистов. Исключение человеческого фактора при проведении экзаменов гарантирует эффективность получения результатов. На рис. 10 представлены фрагменты из программы обучающего комплекса.

Наличие подобной системы без экзаменационного блока в каждой лаборатории по дефектоскопии

при постоянной плановой самоподготовке специалистов позволит на надлежащем уровне поддерживать квалификацию специалистов данной области неразрушающего контроля.

Чтобы оценить знания лиц, прошедших курс обучения, в комплекс включены подпрограммы для проведения экзаменов согласно СТБ ЕН 473-95.

В заключение надо отметить, что в создании комплекса для обучения и оценки профессиональной пригодности дефектоскопистов активное участие принимают

Открытое акционерное общество «Белгазстрой» и орган по подготовке и аттестации специалистов по радиационным методам контроля «Профсертико» из Национальной Ассоциации неразрушающего контроля Республики Беларусь.

1. *Zautomatyzowana obrobka wynikow kontrol radiograficznej* / V. K. Seleg, L. S. Denisov, A. E. Kapustin et al. // *Biuletyn Instytutu spawalnictwa w Gliwicach, Poland.* — 1999. — № 3.
2. *Румянцев С. В.* Радиационная дефектоскопия. — М.: Атомиздат, 1974.
3. *Яшин В. В., Калинин Г. А.* Обработка изображений на языке СИ для IBM PC. — М.: Мир, 1994.
4. *Компьютерная оценка пригодности рентгеногаммаграфических снимков на основе анализа эталона чувствительности* / В. К. Шелег, А. Э. Капустин, А. П. Фокин и др. // *Сварка и родств. технологии.* — 1998. — № 1.
5. *Добромыслов В. А., Румянцев С. В.* Радиационная интроскопия. — М.: Атомиздат, 1972.
6. *Зверева С. В.* В мире солнечного света. — Ленинград: Гидрометеоиздат, 1988.
7. *Computer analysis of radiographic images of welds* / V. K. Sheleg, A. E. Kapustin, I. I. Bardusova et al. // *Proc. of Second internat. congr. «Mechanical engineering technologies'99»*, Sept., 1999, Sofia, Bulgaria. — Vol. 7.

*Научно-исслед. констр.-технол. ин-т сварки и защит. покрытий с опытом пр-вом, Минск, Республика Беларусь*

*Поступила в редакцию 11.01.2001*

# НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ДИАГНОСТИКИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ И ПРЕДРАЗРУШАЮЩЕГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

С. А. БЕЖЕНОВ, С. И. БУЙЛО

Известно, что идентификация какого-либо физического процесса возможна путем установления специфических точек функций (переломы, перегибы, максимумы, минимумы и т. д.) какого-либо параметра, адекватно описывающего этот процесс. Поскольку каждому коллективному акту повреждения (или перестройки) структуры (срыву лавины дислокаций, слиянию микротрещин между собой и с макротрещиной и т. д.) соответствует первичный упругий импульс, процесс излучения которого представляет собой так называемый акт акустической эмиссии (АЭ), то измерение какого-либо параметра АЭ в принципе позволяет исследовать кинетику накопления повреждений и диагностировать ранние стадии разрушения. Однако предпринимаемые ранее попытки исследования кинетики повреждений конструкционных материалов методом АЭ часто оказывались малопродуктивными вследствие сильного искажения регистрируемых сигналов АЭ, потому что при использовании традиционных методов АЭ контроля часто наблюдаются ложные (отсутствующие на самом деле) экстремумы. Для решения этой проблемы весьма плодотворными представляются методы восстановления истинных параметров процесса накопления повреждений по регистрируемым сигналам АЭ [1, 2]. Восстановление параметров потока актов АЭ дает возможность получить истинный вид зависимостей параметров излучаемой АЭ вдоль кривой нагружения и существенно повысить достоверность результатов АЭ диагностики.

В литературе достаточно широко освещены результаты исследований особенностей выделения АЭ в различных материалах при одноосном статическом растяжении. Опубликованных работ, в которых рассмотрены особенности выделения АЭ при неоднородном напряженном состоянии и циклическом нагружении материала, явно недостаточно, и практически отсутствуют публикации по комплексному изучению процессов деформирования и разрушения материалов методом АЭ. В данной работе приведены результаты исследований особенностей выделения АЭ при различных видах нагружения разных конструкционных материалов.

В ранее проведенных исследованиях [1, 3, 4] показана правомерность представления спектра актов АЭ как спектра пуассоновского потока коротких упругих импульсов практически стабильных энергий и использования кинетической концепции прочности [5]. Это позволило предложить следующий способ расчета действительного количества повреж-

дений  $N$  в процессе нагружения материала при одноосном растяжении [6]:

$$\begin{aligned} N &= V n_0 \exp[\gamma_1(\varepsilon - \varepsilon_*)] \quad \text{при } \varepsilon_* \leq \varepsilon < \varepsilon^*, \\ N &= V n_0 \exp[\gamma_1(\varepsilon^* - \varepsilon_*)] - N^* \{1 - \exp[\gamma_2(\varepsilon - \varepsilon^*)]\} \quad \text{при } \varepsilon \geq \varepsilon^*. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $N$  — общее число повреждений (микродофектов) в образце;  $V$  — объем образца;  $n_0$  — исходная (в точке  $\varepsilon = \varepsilon_*$ ) концентрация повреждений  $n = N/V$ ;  $\varepsilon$  — текущая деформация;  $\varepsilon_*$  — деформация перехода к стадии экспоненциального накопления повреждений;  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  — постоянные умножения;  $N^*$  — количество растущих микродофектов в точке  $\varepsilon = \varepsilon^*$ ;  $\varepsilon^*$  — деформация начала локализации процессов повреждения.

Все необходимые параметры формул (1) можно определить по данным АЭ испытаний. Действительно, считая, что каждый акт АЭ соответствует акту повреждения, и продифференцировав выражения (1) по времени с учетом того, что  $\dot{\varepsilon}^*$  — скорость макроскопической деформации, получим:  $\varepsilon_*$  и  $\varepsilon^*$  соответствуют точкам переломов графика  $\ln \dot{N}_a(\varepsilon)$ ;  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  равны тангенсам наклонов соответствующих отрезков графика;  $n_0 = \dot{N}_a^*/V\gamma_1\dot{\varepsilon}$ ,  $N^* = \dot{N}_a^{**}/\gamma_2\dot{\varepsilon}$ , где  $\dot{N}_a^*$  и  $\dot{N}_a^{**}$  определяются по значениям соответственно при  $\varepsilon = \varepsilon_*$  и  $\varepsilon = \varepsilon^*$ .

Предложенный способ иллюстрируется рис. 1, на котором приведены экспериментальные зависимости восстановленной интенсивности потока актов АЭ  $\dot{N}_a$  и регистрируемой по традиционной методике интенсивности потока протектированных радиоимпульсов (вспышек) АЭ  $\dot{N}_d$  (так называемой активности АЭ). Материал имеет следующий состав: 1,0 % С, 18 % Сг, железо — основа (аналог стали 95Х18). Нагружение: одноосное растяжение, скорость деформации  $\dot{\varepsilon} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ .

Видно, что зависимость регистрируемого параметра АЭ  $\lg \dot{N}_d = f(\varepsilon)$  имеет вид немонотонной кривой с явно выраженным максимумом. В то же время зависимость восстановленного параметра АЭ  $\lg \dot{N}_a = f(\varepsilon)$  имеет четко выраженную S-образную форму из трех прямолинейных участков. Причем точки переломов зависимости  $\lg \dot{N}_a = f(\varepsilon)$  соответствуют точкам перегибов кривой  $\lg \dot{N}_d = f(\varepsilon)$ , что дает основание считать эти точки специфическими.

Анализ полученных результатов испытания стали 95Х18 позволяет утверждать, что при  $\varepsilon < \varepsilon^*$  (т. е. до точки нижнего перелома  $\varepsilon_*$ ) происходит накопление актов АЭ вследствие коллективных эффектов при пластической деформации материала без заметного накопления повреждений. Такой вывод следует из результатов количественных расчетов концен-

трации повреждений по данным АЭ на рис. 1, которые показывают, что на этой стадии суммарное (интегральное) количество актов АЭ во много раз превосходит начальную концентрацию поврежденных в точке нижнего перелома кривой.

Участок деформации  $\varepsilon_* \leq \varepsilon < \varepsilon^*$  соответствует стадии хаотического (рассеянного по объему) зарождения и экспоненциального накопления стабильных микротрещин с некоторой постоянной размножения  $\gamma_1$  за счет генерации локальных термофлуктуационных микрповреждений.

Верхний перелом кривой интенсивности потока актов АЭ при деформации  $\varepsilon \geq \varepsilon^*$  определяется изменением постоянной размножения  $\gamma_i$ , очевидно, связан с началом некоторой локализации процессов накопления повреждений перед зарождением макротрещины. Согласно кинетической концепции прочности это происходит при выполнении условий концентрационного критерия укрупнения трещин. Последнее становится возможным лишь при достаточно большой их концентрации, обеспечивающей высокую вероятность объединения хаотически расположенных микротрещин вследствие их попадания в одну и ту же область пространства. Наличие верхнего перелома кривой интенсивности потока актов АЭ можно рассматривать в качестве достаточно надежного предвестника приближения к стадии предразрушающего состояния.

На рис. 2 приведены зависимости измеренных параметров АЭ для жаропрочного двухфазного сплава титана ВТЗ-1 мартенситного класса и никелевого сплава ХН77ТЮР-ВД аустенитного класса при одноосном статическом растяжении. Видно, что характеры распределения параметров АЭ по стадиям процесса деформирования для обоих сплавов являются типичными для пластичных материалов и представляют собой немонотонные кривые, на которых, согласно приведенному выше подходу, также можно выделить специфические точки, соответствующие  $\varepsilon_*$  и  $\varepsilon^*$ , и, следовательно, установить стадию предразрушающего состояния.

Возможность количественной оценки потока повреждений по сигналам АЭ в принципе позволяет осуществить диагностику предразрушающего состояния материала, основываясь на общепринятой концепции стадийности процесса разрушения путем определения стадии разрушения по параметрам АЭ. Однако отсутствие физической связи механических характеристик материала ( $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_b$ ) со стадиями разрушения при статическом одноосном растяжении существенно снижает эффективность применения метода АЭ. Значительно более плодотворным этот метод может оказаться при исследовании стадий процесса усталости конструкционных материалов, границы которых могут быть связаны с характеристиками сопротив-

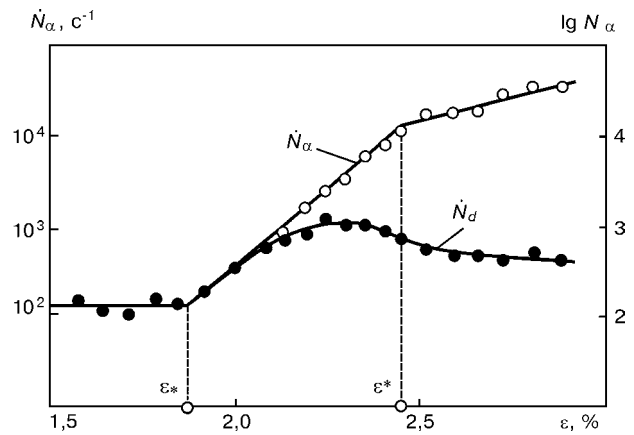


Рис. 1. Зависимость потока актов АЭ от деформации образца из стали 95Х18 при одноосном растяжении ( $N_\alpha$  — восстановленная интенсивность потока актов АЭ;  $N_d$  — регистрируемая активность АЭ).

ления усталости. Как известно, подавляющее число поломок деталей связано с их усталостным разрушением, когда материал подвергается циклическому поперечному изгибу и находится в неоднородном напряженном состоянии.

Исследовались особенности выделения сигналов АЭ в сплаве никеля при статическом нагружении образцов трехточечным изгибом по методике, изложенной в работах [7, 8]. При таком неоднородном напряженном состоянии материала наиболее напряженный поверхностный слой является основным источником сигналов АЭ. Влияние остальной, менее напряженной массы материала, на суммарный поток сигналов АЭ существенно уменьшается, и коррекции (восстановления) измеренного сигнала уже не требуется [9]. На рис. 3 приведена зависимость  $\lg \dot{N} = f(\lg \sigma)$  для образцов из сплава никеля, которая так же, как и в случае одноосного растяжения, состоит из трех прямолинейных участков, но ее характер несколько иной: наклон к оси абсцисс каждого последующего участка больше предыдущего. Различные характеры участков зависимости  $\lg \dot{N} = f(\lg \sigma)$  для условий трехточечного изгиба материала свидетельствует об изменении харак-

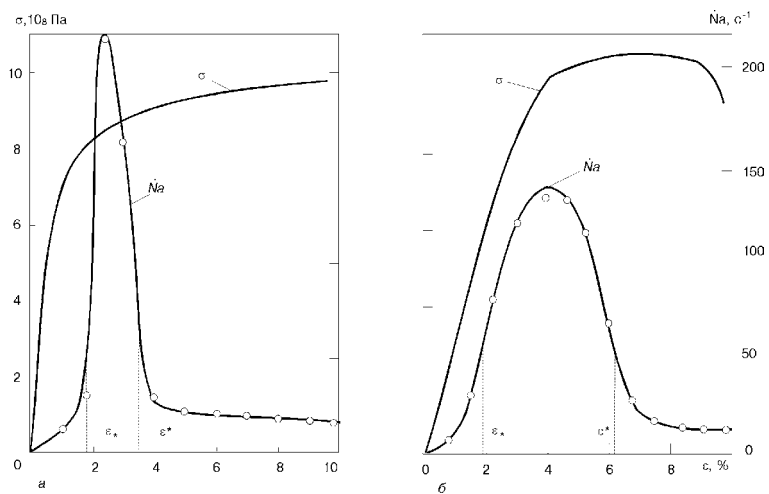


Рис. 2. Зависимости интенсивности потока актов АЭ и растягивающих напряжений от деформации образцов: а — сплав ХН77ТЮР-ВД; б — сплав ВТЗ-1.

терагонапряженно-деформированного состояния [10], что, естественно, должно обуславливать различие механизмов усталостного разрушения при разных уровнях деформирования.

Очевидно, на первой стадии основная масса деформируемого материала испытывает в основном упругую деформацию, когда деструктивно действуют только флуктуационные процессы, приводящие к незначительной АЭ. Активного усталостного процесса при циклическом нагружении материала на этой стадии не наблюдается. Согласно кинетической теории разрушения С. Н. Журкова долговечность материала в таких условиях практически бесконечна.

Во второй стадии деформирования материал испытывает уже упругопластическую деформацию, которая обусловлена поликристаллической структурой металла. Поскольку поликристалл образован множеством отдельных зерен, плоскости скольжения которых ориентированы в пространстве неодинаково, то и напряжения в них возникают неодинаковые: более значительные напряжения испытывают зерна с менее благоприятной ориентировкой по отношению к направлению действующей нагрузки. В более напряженных зонах происходит пластическая деформация материала, приводящая к образованию линий, а затем и полос скольжения. Это при циклическом нагружении должно приводить к нарушению сплошности материала, т. е. к активному процессу усталостного разрушения.

После пластической деформации в перенапряженных зернах напряжения релаксируют, и большие напряжения начинают испытывать уже другие зерна с более благоприятной ориентировкой по направлению к действующей нагрузке. Следовательно, эта стадия нагружения материала характеризуется деструктивными процессами внутри зерен. При циклическом деформировании материала с амплитудой напряжений, соответствующей этой стадии нагружения, согласно энергетической теории разрушения [11] в материале зарождаются и развиваются субмикротрещины. Окончание этого периода усталости связано с накоплением в материале необратимой поврежденности и на обобщенной диаграмме усталости ограничено линией Френча.

Последующая стадия характеризуется пластической деформацией всего деформируемого материала с выходом дефектов кристаллической решет-

ки материала на поверхность. Активность АЭ на этой стадии деформирования металла существенно возрастает, так как деструктивный процесс усталостного разрушения материала переходит границы зерен, в результате чего инициируется процесс интенсивного образования микротрещины.

Проведенные исследования показывают, что на АЭ характеристиках образцов из сплава никеля при статическом трехточечном изгибе четко обозначаются специфические точки, соответствующие перегибам кривой зависимости  $\lg N = f(\lg \sigma)$  и определяющие границы стадий усталостного разрушения.

Для установления связи между характерными точками и характеристиками усталостного разрушения были проведены усталостные испытания образцов из того же сплава в условиях консольного изгиба с коэффициентом асимметрии цикла напряжений  $R_\sigma = -1$ . Из кривой усталости, приведенной на рис. 4, видно, что при напряжении  $\sigma^*$ , соответствующем второй точке перелома зависимости  $\lg N = f(\lg \sigma)$ , происходит разрыв кривой усталости. По сути,  $\sigma^*$  разделяет области мало- и многоциклового усталости. Первое же пороговое значение напряжения  $\sigma_*$ , после которого при циклическом нагружении в материале происходит необратимое накопление повреждений, очевидно, соответствует физическому пределу выносливости  $\sigma_R$ . Однако экспериментальное определение  $\sigma_R$  сопряжено с большими затратами, связанными с длительностью испытания. Поэтому вполне обоснованным является введение в качестве усталостной характеристики в общем-то формального параметра — ограниченного предела выносливости  $\sigma_N$ , определяемого на некоторой базе испытаний.

Проведенные исследования дают основание полагать, что кривую усталости можно экстраполировать по данным усталостных испытаний на более высоких уровнях напряжений, продлевая ее вплоть до физического предела выносливости  $\sigma_*$ , определенного по акустограмме при статическом нагружении по схеме трехточечного изгиба. При этом может быть оценена долговечность материала на любом заданном уровне нагружения. В том числе может быть более определенно установлен ограниченный предел выносливости  $\sigma_N$  как точка пересечения заданной базы испытаний с кривой усталости, продленной до значения  $\sigma_*$ .

Таким образом, проведенными исследованиями разных конструкционных материалов при разных условиях нагружения установлен факт наличия на

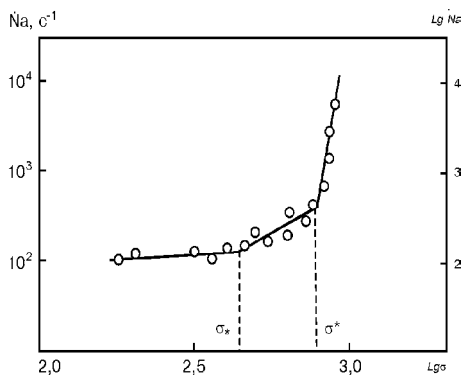


Рис. 3. Зависимость интенсивности потока актов АЭ от изгибных напряжений в образце из сплава ХН77ТЮР-ВД при трехточечном изгибе.

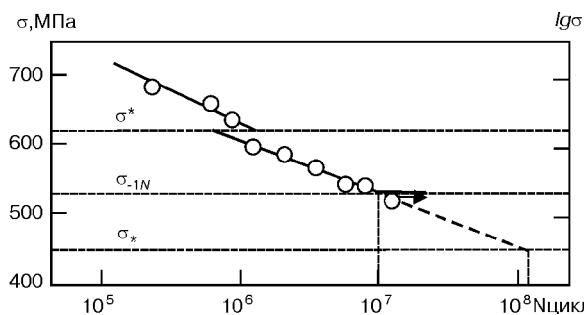


Рис. 4. Кривая усталости образцов из сплава ХН77ТЮР-ВД ( $N$  — количество циклов).

АЭ характеристиках специфических точек, которые свидетельствуют об изменении характера напряженно-деформированного состояния материала и, следовательно, об изменении механизмов его усталостного разрушения. Это позволяет по АЭ характеристикам, полученным в условиях статического нагружения материалов по схеме трехточечного изгиба, определять границу между мало- и многоциклового усталостью материала, оценивать его ограниченный предел выносливости, а также, основываясь на общепринятой концепции стадийности процесса разрушения, путем определения стадий разрушения по параметрам АЭ осуществлять диагностику предразрушающего состояния материала в условиях действия циклических нагрузок.

1. Буйло С. И. Искажение параметров сигналов АЭ и некоторые особенности восстановления статистических характеристик источников излучения // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1989. — № 1. — С. 15–23.
2. Буйло С. И. Определение параметров процесса накопления повреждений и оценка критерия разрушения по восстановленным значениям потока актов акустической эмиссии // Дефектоскопия. — 1997. — № 7. — С. 84–89.
3. Беженов С. О. Деякі аспекти акустоемісійного дослідження атомного руйнування нікелевого ступу з позицій кінетичної теорії міцності // Нові матер. і технол. в металургії та машинобудуванні. — 1999. — № 2. — С. 18–20.
4. Буйло С. И., Беженов С. А. Исследование особенностей акустического излучения при деформировании сплава титана и некоторые результаты АЭ диагностики его предразру-

шающего состояния // Дефектоскопия. — 2000. — № 5. — С. 3–11.

5. Регель В. Р., Слуцкер А. И., Томашевский Э. Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. — М.: Наука, 1974. — 560 с.
6. Буйло С. И. О физической интерпретации S-образного вида кривой потока актов акустической эмиссии и ее связи с потоком повреждений при деформации твердых тел // Современные проблемы механики сплошной среды: Тр. 5-й Междунар. конф. (Ростов-на-Дону, 12–14 окт. 1999 г.). — Ростов-на-Дону: Изд-во СКНЦ ВШ, 2000. — Т. 1. — С. 41–45.
7. Беженов А. И., Беженов С. А. Исследование методом акустической эмиссии влияния поверхностной обработки на характеристики циклической прочности образцов из никелевого сплава // Пробл. прочности. — 1999. — № 3. — С. 139–145.
8. Беженов С. О. Методика дослідження поверхневого шару конструкційних матеріалів методом акустичної емісії // Нові матер. і технол. в металургії та машинобудуванні. — 1999. — № 1. — С. 16–19.
9. Буйло С. И. Об интерпретации максимумов и достоверности оценки вида амплитудного распределения АЭ // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1995. — № 1. — С. 31–38.
10. Беженов С. А. К вопросу определения напряженно-деформированного состояния материала с учетом пластической зоны у вершины трещины // Современные проблемы механики сплошной среды: Тр. 5-й Междунар. конф. (Ростов-на-Дону, 12–14 окт. 1999 г.). — Ростов-на-Дону: Изд-во СКНЦ ВШ, 2000. — Т. 1. — С. 27–31.
11. Иванова В. С., Терентьев В. Ф. Природа усталости металлов. — М.: Металлургия, 1975. — 456 с.

Запорж. гос. техн. ун-т

Поступила в редакцию  
02.02.2001



**УВАЖАЕМЫЕ**

**ГОСПОДА!**



5. Konferenz  
Strahltechnik

**2001**

27 и 28 ноября 2001 г. в Учебно-исследовательском институте (SLV), г. Галле состоится 5-я конференция "Лучевая техника". Эта конференция, которую SLV проводит вместе с Германским Обществом сварки и родственных способов (DVS), предоставит конструкторам, разработчикам и инженерам-производственникам возможность, прослушав доклады в 8 секциях и участвуя в дискуссиях, получить информацию о последних практических разработках и результатах научных исследований в области лучевых технологий.

Настоящая конференция продолжает тенденции прежних конференций в Карлсруэ, Эссене и в мае 1996 г. в Галле будет способствовать тому, что бурно развивающиеся лучевые процессы займут свое достойное место в производственных процессах.

Учитывая прогресс в развитии электронно-лучевого и лазерного способа и аппаратуры по прошествии пяти лет позволит произвести сравнение электроннолучевой обработки с обработкой лазерным лучом на международном уровне.

Тематика конференции соответствует таким проблемам, как применение электронного и лазерного луча, гибридная сварка, концепция производства и стандартизация, подготовка кадров и обеспечение качества. Впервые будет обсуждаться вневакуумная ЭЛС, кроме того, после ряда докладов состоится дискуссия по лучевым технологиям со специалистами из Восточной Европы.

На выставке во время конференции будут представлены известные экспоненты от промышленности и исследовательских центров.

Приглашаем на 5-ю конференцию "Лучевая техника" всех представителей прикладных исследований и разработок, всех коллег из промышленности, которые уже применяют или планируют применение лучевых технологий.

За справками обращаться по тел.: (03 45) 52 46-4 14, (03 45) 52 46-4 18  
www.slv-halle.de

## РАДИОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ АТОМНОГО СОСТАВА

С. В. НАЙДЕНОВ, В. Д. РЫЖИКОВ

Среди новейших разработок в области технической диагностики и неразрушающего контроля выделяется метод цифровой радиографии, в котором объединены преимущества радиологического (сильнопроникающего) способа исследования структуры объектов с уникальными вычислительными возможностями современных компьютеров. Дизайн детекторов цифровой радиографии может быть самым разнообразным [1]. Исключительные возможности предоставляет сцинтилляционный метод (например, [2]) детектирования с линейным сканированием объектов.

Несмотря на достижения радиографии, ее применение в основном ограничено построением качественных изображений исследуемых объектов (в большинстве случаев — восстановление выделенных пространственных сечений). Вместе с тем не используются другие возможности указанного направления. Так, с помощью радиографии доступно исследовать не только пространственную, но и субстанциональную (химическую) структуру объектов мониторинга. Для этого их характерные атомные параметры необходимо восстановить по радиографическим данным. Однако прежде всего важно установить саму возможность радиографического мониторинга атомной (различение веществ) и одновременно пространственной (определение толщин) структур. С этим вплотную связана и задача повышения контрастной чувствительности, особенно при радиографии объектов, физически совмещенных друг с другом. Различение компонентов требуется для тестирования самых разнообразных составных физических объектов: трубопроводов с изоляцией, сварных швов [3], гомогенных смесей веществ, технических узлов и соединений, мягких и костных тканей внутри биологического организма, содержания закрытого багажа и т. д. Определенные успехи в этом направлении уже достигнуты ([4–6] и др.). Существенно, что при этом использовалась не моно-, а многоэнергетическая радиография. Экспериментальные свидетельства преимуществ последней должны иметь ясное физическое объяснение. В данной работе теоретически доказывается, что именно многоэнергетическая радиография позволяет определять атомный состав различных физических объектов. В результате ее практического применения может быть принципиально решена такая важная задача, как контроль и различение неорганических соединений от органических.

**Радиография однородных образцов.** Исследование естественно начать с наиболее простого случая определения атомного состава однородных образцов. При этом зависимость от пространственных координат объекта, влияние на результаты измере-

ний его геометрии и формы, а также расположения относительно детектора (томографический аспект) фактически не учитываются. Кроме того, удобно рассматривать образцы в форме прямоугольной пластины, расположенной перпендикулярно к направлению  $\gamma$ -излучению от внешнего источника. Материал объекта может быть простым или сложным веществом или представлять гомогенную смесь нескольких компонент.

Для «грубого» мониторинга  $R_z$  атомную структуру достаточно охарактеризовать единственным и подлежащим определению параметром — эффективным атомным номером  $Z_{eff}$ . Следующей по важности характеристикой является плотность вещества  $\rho$ . В дальнейшем выяснится, что влияния изменения плотности  $\rho$  и толщины  $l$  на результаты мониторинга эквивалентны друг другу. Вместо величин  $\rho$  и  $l$  свойства объекта будет характеризовать их произведение  $\rho l$ . Способы вычисления  $Z_{eff}$  для веществ с известным химическим составом изложены, например, в [7]. Толщину объекта  $l$  можно считать неизвестной или, наоборот, заданной, в том числе после томографического исследования. В зависимости от практической постановки возникает несколько задач. Для каждой из них система уравнений радиографии, получаемых при теоретическом решении, принимает универсальный вид системы линейных неоднородных уравнений и при определенных условиях допускает однозначное решение. Перейдем к выводу этих основных уравнений.

Физической основой радиографии является поглощение  $\gamma$ -квантов ионизирующего излучения в веществе. При этом поглощение частиц  $N(E)$  или энергии  $E = E_\gamma$   $\gamma$ -излучения происходит как в исследуемом объекте, так и в детекторе, регистрирующем изменение поля излучения. Ограничимся монохроматическим случаем (влияние немонахроматичности будет рассмотрено отдельно). Представим регистрируемый детектором сигнал  $N_f$  в виде

$$N_f(E) = \eta_{eff}(E)N_0(E)\exp[-\mu(E, Z)l], \quad (1)$$

где  $\eta_{eff}$  — полная конверсионная эффективность приемно-детектирующего тракта;  $N_0(E)$  — интенсивность источника;  $\mu(E, Z)$  — коэффициент линейного ослабления в объекте мониторинга. Конверсионная эффективность определяется конструктивными особенностями детектора и зависит от энергии  $E$ . Так как энергетический спектр излучения после прохождения объекта не изменяется (квантовый характер процессов взаимодействия с веществом), то  $\eta_{eff}$  не зависит от свойств этого объекта. Следовательно,  $\eta_{eff}$  можно определять в фоновом режиме (при отсутствии объекта) или из тестовых испытаний. Выбор детектора и разделе-

ние диапазонов излучения, например, с помощью фильтров-отсечек, играют важную роль в практической реализации радиографии. В данной статье остановимся только на теоретическом описании. Тогда можно считать влияние указанных факторов заранее известным и ограничиться картиной поглощения только в исследуемом объекте. От поглощения в нем зависят принципиальные результаты мониторинга.

В радиографии регистрируемый сигнал  $N_f$  в конечном счете представляется в цифровой форме. Следовательно, его можно преобразовать к любому виду и выразить в любых единицах измерения. Вместе с тем при теоретическом описании удобно выбрать логарифмический масштаб и ввести условный (безразмерный) сигнал

$$c(E) = -\ln \left[ \frac{N_f(E)}{n_{eff}(E)N_0(E)} \right], \quad 0 \leq c(E) < +\infty. \quad (2)$$

Для жесткого излучения парциальные каналы поглощения в слоях разных веществ или для разных элементов сложного соединения будут независимыми. Поэтому в новых обозначениях уравнения радиографии многослойной и (или) многокомпонентной системы примут вид

$$c(E_i) = \sum_{j=1}^L \mu(E_i, Z_j)l_j, \quad i = 1 \dots N, \quad (3)$$

где индекс  $N = 1, 2, 3, 4, \dots$  определяет мультиэнергетичность, а  $L$  обозначает число слоев. Наиболее перспективной (по целому ряду причин) представляется двух-, трех- и четырехэнергетическая радиография.

Выберем область  $0,01 \text{ МэВ} \leq E \leq 0,50 \text{ МэВ}$  энергии  $\gamma$ -квантов. В большинстве случаев используется именно этот диапазон. В нем доминируют два независимых механизма поглощения — фотоэффект и комптоновское рассеяние (например, [8]). Начиная с порога  $K$ -поглощения в данном материале, соответствующие коэффициенты ослабления монотонно изменяются с ростом энергии излучения. Для фотоэффекта это означает быстрый спад поглощения по характерной эмпирической ( $\sim(E)^{-3}$ ) или теоретической ( $\sim(E)^{-7/2}$ ) зависимости. Полное сечение комптон-эффекта, рассчитанное по формуле Клейна–Нишины–Тамма, также спадает, но не столь быстро ( $\sim(1 \dots 4)E$ , МэВ). Отметим, что для некоторых соединений энергетическая зависимость истинного комптоновского поглощения в этой области энергией (за вычетом упругого рассеяния) может быть возрастающей. Существенно различной, нелинейной для фотоэффекта ( $\sim(Z)$ ) оказывается зависимость поглощения от атомного номера. В общем случае коэффициент линейного ослабления удобно представить в виде

$$\mu(E, Z) = \rho \left[ \alpha(E) \sum_{k=1}^M a_k Z_k^4 + \beta(E) \sum_{k=1}^M a_k Z_k \right], \quad (4)$$

где  $\rho$  — плотность (массовая) вещества;  $\alpha(E)$  и  $\beta(E)$  — энергетические зависимости сечений поглощения фотоэффекта и комптоновского рассеяния, микроскопические выражения которых извест-

ны (например, [7–9]);  $M$  — число простых элементов в сложном соединении;  $a_k$  — их относительные атомные (мольные) доли.

Самым доступным является мониторинг однослойной системы, для которой  $L = l$  и  $l_j = 1$ . Выразим коэффициент ослабления слоя данного вещества через его  $Z_{eff}$ :

$$\mu(E, Z_{eff}) = \rho [\alpha(E)Z_{eff}^3 + \beta(E)]Z_A, \quad Z_A = \sum_{k=1}^M a_k Z_k, \quad (5)$$

где  $Z_A$  обозначает средний атомный номер, а эффективный атомный номер  $Z_{eff}$  сложного вещества вычисляется по фотоэффекту. В рамках точности рассматриваемого мониторинга (порядка нескольких десятков процентов, в зависимости от типа соединения) можно считать выполненным условие неразличимости эффективных параметров

$$Z \equiv Z_{eff} = Z_{eff,\tau} = Z_{eff,\chi} = Z_A,$$

в котором  $Z_{eff,\tau}$  и  $Z_{eff,\chi}$  соответствуют расчету  $Z_{eff}$  по фотоэффекту ( $\tau$ ) и эффекту рождения пар ( $\chi$ ). В последнем случае энергия излучения  $E \geq 1,022 \text{ МэВ}$ . Очевидно, что для простых веществ выполняется строгое равенство  $Z = Z_{eff,\tau} = Z_{eff,\chi} = Z_A$ . Фактор разброса значений параметра  $Z_{eff}$  должен учитываться при «точном» мониторинге (определение атомных долей составляющих сложного соединения), который здесь не рассматривается.

Введем, кроме обычной плотности  $\rho$ , плотность навески  $\delta = \rho l$ , определяющую массу на единицу площади элементарного слоя толщины  $l$ . Используем переменные  $u = \delta Z^4$  и  $v = \delta Z$ . Выделим «константы» мониторинга, т. е. величины, которые тем или иным образом уже известны и не подлежат дальнейшему определению при проводимой радиографии:

$$\alpha_i = \alpha(E_i), \quad \beta_i = \beta(E_i), \quad i = 1, 2. \quad (7)$$

В монохроматическом случае в качестве  $\alpha_i$  и  $\beta_i$  можно использовать их усредненные значения в пределах каждого  $i$ -го диапазона  $\gamma$ -излучения. Уравнения мониторинга (3) примут следующий вид:

$$R_z = \begin{cases} c_1 = \alpha_1 u + \beta_1 v, \\ c_2 = \alpha_2 u + \beta_2 v. \end{cases} \quad (8)$$

В данном случае достаточно двухэнергетической радиографии ( $N = 2$ ), так как независимых неизвестных только две —  $Z_{eff}$  и  $\delta$ . Если известна одна из двух величин (толщина образца  $l$  или плотность материала  $\rho$ ), то можно определить другую, предварительно вычислив  $\delta = \rho l$ . Итак, двухэнергетический мониторинг можно использовать как для определения атомного состава, так и толщины, а следовательно, и пространственной структуры объектов. В тех случаях, когда требуется определить большее число структурных характеристик, необходима многоэнергетическая радиография:  $N \geq 3$ , число ее уравнений также увеличивается.

**Двухэнергетическая радиография.** Выпишем решение уравнений (8) для двухэнергетической радиографии  $R_z$ :

$$u = -\frac{\beta_1 c_2 - \beta_2 c_1}{\alpha_1 \beta_2 - \alpha_2 \beta_1}, \quad v = \frac{\alpha_1 c_2 - \alpha_2 c_1}{\alpha_1 \beta_2 - \alpha_2 \beta_1}, \quad \alpha_1 \beta_2 - \alpha_2 \beta_1 \neq 0. \quad (9)$$

Укажем на важную роль последнего неравенства. Оно определяет необходимое и достаточное условие существования теоретического решения — условие разрешимости системы линейных уравнений. В практическом отношении им устанавливается некоторое ограничение на выбор энергетического диапазона и характерных энергий  $E_1$  и  $E_2$  в максимумах поглощения излучения детекторами системы (в фоновом режиме). Это ограничение является не слишком жестким, и фактически всегда можно надеяться на его реальное выполнение. Подчеркнем, что согласно определению величин  $\alpha$  и  $\beta$  они сами, а с ними и указанное условие не зависят от свойств детектора и слабо зависят от свойств исследуемого материала. Эти величины определяются в основном энергией излучения, например, выбором ускоряющего напряжения рентгеновской трубки — источника  $\gamma$ -излучения — или системы фильтров, вырезающих спектральные диапазоны многоэнергетической радиографии. В качестве такого фильтра может выступать один из детекторов многоступенчатой сборки, поглощающий часть спектра излучения. В каждом конкретном случае условие реализации мониторинга, обеспечивающее регулярность выражений (9), можно проверять опытным путем или рассчитывать теоретически, в том числе по результатам тестовых испытаний.

Искомые величины двухэнергетического мониторинга определяются из выражений

$$Z_{eff} = \frac{\sqrt[3]{U}}{v} = \frac{\sqrt[3]{\beta_2 c_1 - \beta_1 c_2}}{\alpha_1 c_2 - \alpha_2 c_1}, \quad \rho l \equiv \delta = \frac{v}{Z} = \frac{\alpha_1 c_2 - \alpha_2 c_1}{\alpha_1 \beta_2 - \alpha_2 \beta_1} \left( \frac{1}{Z_{eff}} \right). \quad (10)$$

Выражение для  $Z_{eff}$  явно не зависит ни от плотности, ни от толщины исследуемого материала. В него входят только константы мониторинга  $\alpha$  и  $\beta$  (диапазоны излучения фиксированы) и радиографические данные  $c_1$  и  $c_2$  для двух оцифрованных «изображений» объекта, снимаемых одновременно или порознь (две линейки или единая сборка детекторов). Эта универсальность выражений для  $Z_{eff}$  сохраняется и в общем случае, что, по-видимому, позволит эффективно определять атомный номер в более сложных ситуациях, например, для неоднородных, многослойных или объектов неправильной формы и несимметричного расположения и т. п. Второе из выражений (10) можно использовать для определения плотности  $\rho$ , если известна толщина  $l$  исследуемого образца. Интересным может оказаться и обратный аспект — вычисление толщин объекта переменного сечения. Такие результаты будут достаточно точными, так как плотность многих физических объектов не сильно изменяется от одной точки объекта к другой. Полученные формулы будут справедливы в пределах элементарного слоя поглощения, «вырезаемого» излучением при одношаговом сканировании объекта.

Обсудим особенности мониторинга. Из формулы (10) величина  $\delta$  обратно пропорциональна  $Z_{eff}$ . Это соответствует тому, что более тяжелые по атомному весу соединения сильнее ослабляют излучение и требуют меньших эффективных толщин. Далее,

как следует из выражений (10), одинаковым радиографическим показаниям  $c_{1,2}$  (значения  $\alpha$  и  $\beta$  фиксированы) соответствует одно и то же значение комбинации  $(Z_{eff}, \delta)$ . Показания  $c_{1,2}$  можно рассматривать или как полученные от одного двухэнергетического интроскопа, или как формально объединенные показания двух различных моноэнергетических детекторов. Предположим, что при этом не изменятся показания каждого из детекторов, а значит, и системы в целом. Тогда из этого следует вывод, что моноэнергетическая радиография (и ее изображения объектов) позволяет судить лишь о составной величине  $(Z_{eff}, \delta)$ , а двухэнергетический подход позволяет определить  $Z_{eff}$  и  $\delta$  в отдельности. Другой особенностью многоэнергетической радиографии любого типа будет то, что невозможно разделить входящие в  $\delta$  зависимости  $\rho$  и  $l$ , если только одна из этих величин не определена заранее. Появление фактора  $\delta$  носит всеобщий характер и связано с тем, что линейный коэффициент ослабления жесткого излучения всегда пропорционален плотности вещества. Физическое влияние факторов  $\rho$  и  $l$  на поглощение, зависящее только от  $\delta$ , неотличимо. Для одновременного различения объекта по плотности и толщине необходимо привлекать дополнительные, например томографические, методы. Однако информация о величинах  $Z_{eff}$  и  $\delta$ , полученная при многоэнергетической радиографии объекта, будет полной.

Из выражений (10) следует, что при слишком близком выборе диапазонов мониторинга, когда  $E_1 \approx E_2$ , «разрешение» структурных характеристик резко ухудшается. Возникающая при этом неопределенность вызвана физической неразличимостью мультиэнергетических «изображений» объекта. Ее математическое происхождение кроется в неразрешимости системы линейных уравнений при равном нулю определителе. Это и есть нарушение последнего условия в формулах (9). Поэтому даже грубый, но моноэнергетический мониторинг атомного состава принципиально невозможен. Такой мониторинг невозможен и при использовании лишь одного из каналов поглощения. В этом случае неопределенность выражений (10) возникает из-за того, что обращается в нуль пара коэффициентов:  $\alpha_{162} = 0$  или  $\beta_{162} = 0$ . Аналогичные условия разрешимости будут возникать и в других реализациях многоэнергетической радиографии. Линейность ее уравнений является прямым следствием использованных представлений об экспоненциальном характере поглощения излучения.

Из-за монотонного характера энергетической зависимости полного сечения поглощения в области преимущественного действия фото- и комптон-эффекта при вариациях энергии излучения монотонным будет и соответствующее изменение выражения  $(\alpha_1 \beta_2 - \alpha_2 \beta_1)$ . Следовательно, достаточное разнесение диапазонов измерения обеспечит уверенное выполнение необходимого условия  $\alpha_1 \beta_2 - \alpha_2 \beta_1 \neq 0$ . К тому же последнее (из-за указанной монотонности) не будет нарушаться и при флуктуациях, связанных с нестабильностью внешнего источника. Поэтому область энергий от нескольких десятков до



нескольких сотен кэВ является исключительно удачной для радиографии атомного состава.

Многоэнергетической радиографии свойственна своеобразная «дополнительность». С ростом мультиэнергетичности потенциально доступная информация о структуре объекта становится богаче. Однако для её извлечения из радиографических данных потребуется не только больше вычислений (с учетом возможностей современных компьютеров это не будет существенным препятствием), но и усиление ограничений на выбор диапазонов излучения. С последним связаны:

1) требование согласования с детектирующей системой — детекторы должны наиболее эффективно регистрировать излучение именно в данных диапазонах;

2) потеря точности измерений из-за совместного действия флуктуаций многих факторов (для каждого из парциальных каналов мониторинга). Из-за этих причин практически наиболее перспективным остается двух-, трех- и четырехэнергетический мониторинг.

**Результаты радиографического мониторинга.**

Параметры атомной структуры, вычисленные из выражений (10), зависят от постоянных мониторинга  $\alpha$  и  $\beta$ . Последние не зависят или зависят сравнительно слабо от исследуемого объекта и свойств детектирующей системы. Поэтому их можно считать фиксированными при заданном выборе диапазонов излучения и определить из тестовых измерений на однородных образцах известного состава ( $Z_j$  и  $\rho_j$ ) и толщины  $l_j$ . Для двухэнергетического ( $N = 2$ ) случая требуется 4 таких испытаний (для 2 фиксированных объектов разного состава при двухэнергетической радиографии каждого). Примем следующие обозначения:

$$c_{ij} = c(E_i, Z_j, \delta_j), u_j = Z_j^4 \delta_j, v_j = Z_j \delta_j, \quad (11)$$

где  $c_{ij}$  — результаты тестового мониторинга;  $\delta_j = \rho_j l_j, j = 1, 2$ . Теперь считаем известными величины  $\alpha_i$  и  $\beta_i$ . Систему соответствующих уравнений радиографии запишем в виде

$$\begin{aligned} \alpha_1 u_1 + \beta_1 v_1 &= c_{11}, \alpha_1 u_2 + \beta_1 v_2 = c_{12}, \\ \alpha_2 u_1 + \beta_2 v_1 &= c_{21}, \alpha_2 u_2 + \beta_2 v_2 = c_{22}. \end{aligned} \quad (12)$$

Ее решение — величины  $\alpha$  и  $\beta$  — определяется однозначно. Для тестирования следует использовать разные вещества  $Z_1 \neq Z_2$  (см. ниже). Можно выбирать образцы одинаковой толщины — тогда  $l_1 = l_2 = l$  и  $\delta_{1(2)} = \rho_{1(2)} l$ . Условием разрешимости мониторинга будет

$$\alpha_1 \beta_2 - \alpha_2 \beta_1 = \frac{c_{11} c_{22} - c_{12} c_{21}}{Z_1 Z_2 (Z_1^3 - Z_2^3) \delta_1 \delta_2} \neq 0. \quad (13)$$

Вводя чувствительность детектора, т. е. предельно регистрируемый пороговый сигнал  $c_B$ , уровень которого лимитирован (в том числе флуктуациями системы), уточним условие (13):

$$c_{11} c_{22} - c_{12} c_{21} \gg c_B. \quad (14)$$

Соотношение (14) можно проверить после серии тестовых испытаний и оценить влияние энергетической расстройки источника излучения на разре-

шимость мониторинга. При необходимости такие проверочные измерения можно выполнить для достаточно большого числа веществ и при различных толщинах образцов. Тем самым практически решается вопрос о корректном выборе диапазонов двухэнергетического мониторинга.

Используя тестовые значения  $c_{ik}$  из формулы (11) для двух веществ с известными параметрами  $Z_{1,2}^*$  и  $\delta_{1,2}^*$ , можно придать выражениям (10) окончательный вид формул двухэнергетического мониторинга, в который входят только радиографические данные  $c_{1,2}$  об образцах объекта:

$$Z_{eff} = Z_{eff}(c_1, c_2) = \sqrt{\frac{Z_1^* \delta_1^* (c_{12} c_2 - c_{22} c_1) - Z_2^* \delta_2^* (c_{11} c_2 - c_{21} c_1)}{Z_1^* \delta_1^* (c_{12} c_2 - c_{22} c_1) - Z_2^* \delta_2^* (c_{11} c_2 - c_{21} c_1)}}, \quad (15)$$

$$\delta = \delta(c_1, c_2) = \frac{Z_1^* \delta_1^* (c_{12} c_2 - c_{22} c_1) - Z_2^* \delta_2^* (c_{11} c_2 - c_{21} c_1)}{c_{11} c_{22} - c_{12} c_{21}} \left( \frac{1}{Z_{eff}} \right). \quad (16)$$

Аналогичные зависимости можно получить для мониторинга в области высоких энергий, где доминирует эффект рождения пар. Особенностью выражения (15) для  $Z_{eff}$  является отсутствие в нем фактора  $c_{11} c_{22} - c_{12} c_{21}$ , ограничивающего точность вычислений при нарушении условия разрешимости (14). Значит, даже при не очень удачном выборе диапазонов излучения эффективный атомный номер можно определить достаточно точно. Эта «гибкость» двух- и многоэнергетического мониторинга должна сыграть важную практическую роль, обеспечивая его высокую эффективность. Полученные выражения (15)–(16) можно использовать для восстановления структурных параметров  $Z_{eff}$  и  $\delta$  объектов по результатам их радиографии. Важно отметить, что полученные теоретические выражения замкнуты, так как в них входят только радиографические данные  $c_{1,2}$  и константы  $c_{ik}^*$  тестовых испытаний. Выполнив тестовые и проверочные испытания, можно экспериментально проверить эффективность предложенного многоэнергетического подхода.

**ВЫВОДЫ**

Метод многоэнергетической и, в частности, двухэнергетической радиографии пригоден для количественного определения химического состава различных физических объектов. Для определения эффективного атомного номера и плотности (навески) достаточно двухэнергетической радиографии. Во всех случаях появляется условие существования решений уравнений радиографии. Физически ему соответствует сама возможность указанного мониторинга. Это условие определяет выбор энергетических диапазонов излучения, в которых детекторы системы должны наиболее эффективно регистрировать прошедшее излучение.

В целом многоэнергетический подход и его модификации (2-, 3- и 4-х энергетическая) весьма перспективны во многих важных областях (количественный мониторинг функциональных материалов; контроль взрывчатых и опасных веществ, который до сих пор в большинстве случаев осуществляется с помощью более сложной и дорогостоящей нейт-

ронной техники [10]; медицинская томография и т.п.). В ряде указанных направлений применение многоэнергетической радиографии уже принесло значительные успехи.

1. *Harrison R. M.* Digital radiography — a review of detector design // Nucl. Instr. and Meth. — 1991. — **24**, № А310.
2. *Кристаллы* сцинтилляторов и детекторы излучений на их основе / Л. В. Атрощенко, С. Ф. Бурачас, Л. П. Гальчицкий и др. — Киев: Наук. думка, 1998.
3. *Неразрушающие* методы контроля сварных соединений / С. В. Румянцев, В. А. Добромислов, О. И. Борисов, Н. Т. Азаров. — М.: Машиностроение, 1976.
4. *15th world conf. on non-destructive testing. Session of methods and instrumentation, Rome (Italy), 15–21 Oct., 2000.* — Abstracts Book. — 800 p.

5. *Heimann Systems.* Prospects, Germany, 2001.
6. *Scintillator-photodiode* detecting systems for two-level X-ray inspection systems / V.D. Ryzhikov et al. // 15th World Conference on Non-Destructive Testing, Rome (Italy), 15–21 Oct., 2000. — Rome: Abstracts Book. — 2000. — P. 466.
7. *Иванов В. В.* Курс дозиметрии. — М.: Атомиздат, 1978.
8. *Немец О. Ф., Гофман Ю. В.* Справочник по ядерной физике. — Киев: Наук. думка, 1975.
9. *Берестецкий В. Б., Лифшиц Е. М., Пятаевский Л. П.* Квантовая электродинамика // Теоретическая физика. В 10 т. — М.: Наука, 1989. — Т. IV. — 728 с.
10. *Grodzins L.* Nuclear techniques for finding chemical explosives in airport luggage // Nucl. Instr. and Meth. — 1991. — **829**, № В36/37.

НТК «Ин-т монокристаллов» НАН Украины,  
Харьков

Поступила в редакцию  
10.04.2001

## ПЕРЕЧЕНЬ МЕРОПРИЯТИЙ, ПРОВОДИМЫХ УКРАИНСКИМ ИНФОРМАЦИОННЫМ ЦЕНТРОМ «НАУКА, ТЕХНИКА, ТЕХНОЛОГИЯ» В 2002 г.:

- Вторая Промышленная конференция с международным участием и блиц-выставка «ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕАЛИЗАЦИИ НАУЧНОГО, РЕСУРСНОГО И ПРОМЫШЛЕННОГО ПОТЕНЦИАЛА в современных условиях» (СЛАВПРОМ).  
**Место проведения:** п. Славско, Карпаты, пансионат «Бойкивщина», 25 февраля – 1 марта 2002 г.
- Международная конференция «ИСТОРИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СВАРКИ И РОДСТВЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ» (Бенардосовские чтения) в рамках 4 специализированной выставки «СВАРКА УКРАИНА 2002».  
**Место проведения:** г. Киев, Национальный Комплекс «Экспоцентр Украины», ИЭС им. Е. О. Патона, 24–26 апреля 2002 г.
- ДВАДЦАТЬ Вторая ежегодная Международная конференция и выставка «КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ» (СЛАВПОЛИКОМ).  
**Место проведения:** г. Ялта, 27–31 мая 2002 г.
- Десятый Юбилейный ежегодный Международный семинар-выставка «СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ».  
**Место проведения:** г. Ялта, 16–20 сентября 2002 г.
- ДЕСЯТАЯ Юбилейная ежегодная Международная конференция и выставка «ТЕХНОЛОГИИ РЕМОНТА МАШИН, МЕХАНИЗМОВ, ОБОРУДОВАНИЯ» (РЕМОНТ).  
**Место проведения:** г. Киев, ИЭС им. Е. О. Патона, 7–10 октября 2002 года.

**Почтовый адрес: 02094, Киев, а/я 488 тел/факс (044) 573 30 40**  
**e-mail: office@seminar.freenet.kiev.ua glavackaya@softhome.net**

# АНАЛИЗ РАЗРУШЕНИЙ И ВОЗМОЖНОСТИ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА КИСЛОРОДНЫХ БАЛЛОНОВ

**В. М. ДОЛИНСКИЙ, В. Н. СТОГНИЙ, В. Г. НОВИК, Д. Г. РЯУЗОВ, В. И. ЧЕРЕМСКАЯ, Г. Я. БЕЗЛЮДЬКО, Е. И. ЕЛКИНА, А. И. ИЛЬИНСКИЙ**

В последнее время участились случаи аварийного разрушения кислородных баллонов. В 1998–2001 гг. в УкрНИИХиммаше было рассмотрено четыре случая аварийных разрушений кислородных баллонов на территории Украины. В исследованиях по выяснению причин разрушения принимали также участие сотрудники кафедры «Материаловедение» Харьковского национального политехнического университета и фирмы «Специальные научные разработки».

Во всех случаях разрушались баллоны, изготовленные из стали Дс, емкостью 40 литров с рабочим давлением 15 МПа. Их характеристики представлены в табл. 1. Только в одном случае (№ 1, табл. 1) баллон разрушился при рабочем давлении 15 МПа при заправке на Харьковском автогенном заводе. В остальных трех разрушение наступило в рабочих условиях при газопламенной резке металла в результате внезапного повышения давления до уровня, в несколько раз превышающего рабочее давление.

Проведенные металлографические экспертизы показали, что во всех случаях химический состав стали удовлетворял нормативным требованиям. Ее структура представляла перлитно-ферритную смесь, содержащую включения MnS или FeS, что характерно для данного типа стали [1]. Механические характеристики также удовлетворяют нормативным требованиям [2]. Металл был достаточно пластичным, а запасы прочности для трех баллонов превышали допустимое значение, равное 2,6 [3].

В единственном случае (№ 1) запас прочности оказался меньше единицы. Такое явление возникло в результате коррозионно-усталостного роста тре-

щин. Трещины «проросли» на большей части толщины стенки сосуда, так что остаточная толщина составляла 0,56... 2,00 мм. Берега трещины имели коррозионные отложения, что свидетельствует о значительном сроке ее развития (этот вывод подтвержден также фрактографическими исследованиями). В рассматриваемом случае баллон разорвался только на пять частей, тогда как в остальных случаях число осколков составляло несколько десятков, некоторые разлетелись на значительное расстояние, и найти их не удалось. Шевронный профиль поверхностей разрыва свидетельствовал о большой скорости процесса. На ряде фрагментов баллонов имелись неглубокие (1... 2 мм) трещины. Это обстоятельство дает основание для предположения, что причиной их инициирования в баллоне (случай № 1) могло быть повышение давления выше рабочих параметров.

На представленных фрагментах всех разрушенных баллонов измерялась коэрцитивная сила (КС) структуроскопом КРМ-ЦК-2. Как известно [4], ее приращение коррелирует с приращением пластических деформаций. При этом для каждой марки углеродистой стали существует свое предельное значение КС, соответствующее предельным механическим характеристикам: пределу прочности, остаточным удлинениям при разрыве, поперечному сужению образца [5].

Для оценки процесса накопления пластических деформаций стали Дс на Ждановском металлургическом комбинате был выполнен комплекс исследований, включающий измерения КС в процессе изготовления баллонов, а также их гидравлического нагружения в области упругих и пластических

**Таблица 1. Характеристики аварийно-разрушившихся баллонов**

№ п/п	№ баллона	Год изготовл.	Год аварийного разруш.	S, мм	S <sub>н</sub> , мм	R <sub>m</sub> , МПа	R <sub>m</sub> <sup>n</sup> , МПа	R <sub>c</sub> , МПа	R <sub>c</sub> <sup>n</sup> , МПа
1	243882	1969	1998	6,4	6,8	688	638	376	373
2	И26108	1963	1999	6,6	6,8	669	638	—	373
3	—	—	2000	6,5	6,8	695	638	368	373
4	100462	—	2000	7,1	6,8	764	638	557	373

**Продолжение таблицы 1**

№ п/п	δ <sub>s</sub> , %	δ <sub>s</sub> <sup>n</sup> , %	Ψ, %	a, Дж/см <sup>2</sup>	a <sub>n</sub> , Дж/см <sup>2</sup>	p <sub>m</sub> , МПа	n <sub>b</sub>	n <sub>b</sub> <sup>n</sup>	H <sub>m</sub> , А/см
1	21,5	15,0	33,0	37	30	12,0	0,80	2,6	10,0
2	18,0	15,0	52,0	45	30	41,7	2,78	2,6	—
3	21,0	15,0	36,0	41	30	42,6	2,84	2,6	10,5
4	17,8	15,0	41,0	30	30	51,2	3,41	2,6	10,2

Примечания: 1. S, S<sub>н</sub> — минимальная толщина стенки; R<sub>m</sub>, R<sub>m</sub><sup>n</sup> — предел прочности материала; R<sub>c</sub>, R<sub>c</sub><sup>n</sup> — предел текучести материала; δ<sub>s</sub>, δ<sub>s</sub><sup>n</sup> — относительное удлинение; Ψ — относительное сужение; a — ударная вязкость; p<sub>m</sub> — разрушающее давление; n<sub>b</sub>, n<sub>b</sub><sup>n</sup> — коэффициент запаса по пределу прочности; H<sub>m</sub> — КС.

2. Обозначениям с индексом «и» соответствуют значениям по [1].

**Таблица 2. Программа испытаний на циклическую прочность**

Давление, МПа	17,0	22,5	27,0	31,5	37,5	41,5	44,0	46,0	47,0
Количество циклов нагружения	10001	101	2	100	201	100	100	100	45

деформаций при статически и циклически изменяющейся нагрузке вплоть до разрушения.

Установлено, что на заготовках-трубах наибольшие значения КС (5,5... 6,5 А/см) возникают в продольном направлении — в поперечном значения КС на 1,0... 1,5 А/см меньше. В процессе закатки значения КС на цилиндрической части корпуса возрастают, достигая 7 А/см. При этом поперечная КС практически не меняется. На днищах значения КС находятся в пределах 3... 4 А/см. При термообработке (нормализация при 830... 870°С и охлаждение на воздухе) значения КС не изменяются, как и в процессе гидравлических испытаний при давлении 22,5 А/см.

Для проверки предположения о зависимости накопления пластических деформаций от срока эксплуатации объекта были выполнены замеры КС баллонов на Харьковском автогенном заводе и на ОАО «Житомирвртормет» (всего было обследовано около 150 штук). На рис. 1 представлены результаты замеров КС и срок службы для произвольной выборки из 20 объектов. Как видно, корреляционная связь между КС и временем эксплуатации отсутствует.

Для исследования изменения КС в процессе накопления деформаций были отобраны 8 баллонов (5 Харьковского автогенного завода и 3 Южной железной дороги). На каждом из них измеряли значения толщины стенки (ультразвуковым толщиномером УТ-93П), диаметра (микрометрической скобой) и КС (структуроскопом КРМ-ЦК-2). Указанные измерения проводились в десяти осевых сечениях по шести образующим цилиндрической части корпуса. Кроме того, выборочно выполнялся контроль на наличие трещин с помощью ультразвукового дефектоскопа УД2-12, а также измерялась твердость металла на пределах текучести и прочности [6, 7]. После этого определялись сами пределы текучести и прочности.

Все баллоны подвергали гидравлическому давлению до разрушения. Один баллон исследовали при циклическом нагружении по режиму, приведенному в табл. 2, остальные — при ступенчатом статистическом. На каждой ступени нагружения выполнялись указанные выше замеры в нагруженном и разгруженном состоянии за исключением

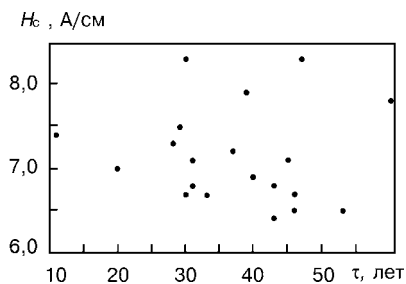


Рис. 1. Максимальные значения продольной КС  $H_c$  материалов обследованных баллонов в зависимости от отработанного ресурса  $\tau$ .

трех-пяти последних ступеней, где измерения выполнялись только в разгруженном состоянии.

Расчетным путем определяли радиальные пластические деформации  $\epsilon$  при степенной зависимости интенсивности напряжений — интенсивности деформаций [8]:

$$\epsilon = \frac{\sqrt{3}}{2} \left[ \frac{\sqrt{3}p(D-S)}{4AS} \right]^{1/n}$$

где  $p$  — давление;  $D, S$  — соответственно наружный диаметр и толщина стенки корпуса;  $A, n$  — коэффициенты степенной зависимости интенсивности напряжений — интенсивности деформаций. Полученные теоретические данные удовлетворительно согласуются с экспериментальными (рис. 2).

Определялись также предельные давления соответственно на пределах прочности ( $p_m$ ), текучести  $p_y$  и устойчивого пластического деформирования  $p_e$ :

$$P_m = R_m[2S/(D-S)], \quad p_y = 2(2/\sqrt{3})^{(1+n)} A[S/(D-S)] \epsilon_y^n, \\ \epsilon_y = \exp(n/2) - 1, \quad p_e = R_e [2S/(D-S)].$$

Здесь  $R_e, R_m$  — соответственно пределы текучести и прочности;  $\epsilon_y$  — относительные деформации по условию устойчивости пластического деформирования.

Обобщенные данные расчетов представлены в табл. 3.

Анализ полученных результатов позволяет установить определенные закономерности:

1. Толщины днищ на 2... 4 мм больше максимальных значений толщин на цилиндрической части корпуса. Толщины цилиндрической части корпуса не одинаковы — на каждом баллоне разность между их максимальным и минимальным значением лежит в пределах 1... 2 мм.

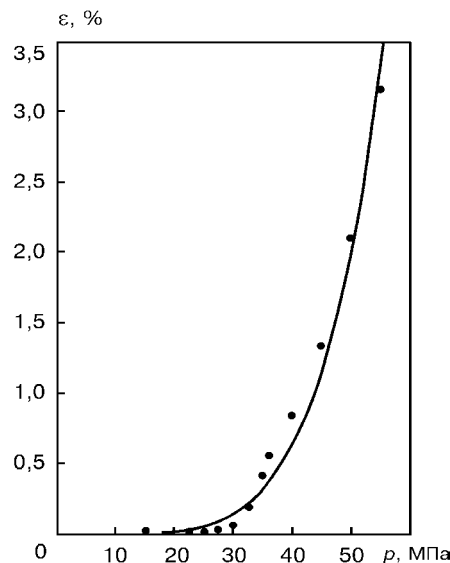


Рис. 2. Зависимость радиальных деформаций от давления: точки — экспериментальная; кривая — теоретическая.

Таблица 3. Результаты расчетов и гидротестирования партии баллонов

Параметр	Порядковый номер баллона								Нормат. данные
	1	2	3	4	5	6	7	8	
№ заводск.	132752	121846	83678	120069	5302	911	42959	14810	—
Год изгот.	1951	1954	1958	1965	1969	1973	1985	1989	—
$D_{max}$ , мм	—	222,92	222,26	—	221,60	220,85	221,76	221,13	222,2
$D_{min}$ , мм	—	222,11	219,31	—	220,74	219,47	221,10	220,31	215,7
$S_{min}$ , мм	6,1	6,3	7,3	7,7	7,0	7,9	7,4	6,6	6,8
$R_m$ , МПа	676	672	634	651	619	634	593	698	638
$R_e$ , МПа	384	—	320	—	—	354	310	—	373
$P_m$ , МПа	38,8	39,2	43,4	47,5	40,6	47,2	41,0	43,0	—
$p_y$ , МПа	—	51,7	49,8	—	55,0	62,5	48,8	58,5	—
$p_m$ , МПа	37,1	46,4	48,3	47,3	51,5	56,1	49,2	55,3	—
$n_m$	2,47	3,09	3,22	3,15	3,48	3,74	3,28	3,69	2,6
$p_e$ , МПа	21,3	—	21,0	—	—	25,4	20,7	—	—
$p_e^*$ , МПа	32,1	29,6	31,2	31,4	27,5	32,0	29,3	32,5	—
$\epsilon_y$ , %	—	8,1	7,4	—	7,2	8,9	4,7	7,5	—
$\epsilon_m$ , %	2,42	2,51	2,57	2,63	2,95	3,17	5,65	2,53	—
$K_c$ , А/см	7,7	7,1	7,2	7,7	6,8	7,5	6,2	7,8	—
$K_m$ , А/см	10,1	10,8	9,3	10,2	9,8	10,0	9,5	10,4	—
$\Delta K$ , А/см	2,4	3,7	2,1	2,5	3,0	2,5	3,3	2,6	—

Примечание:  $D_{max}$ ,  $D_{min}$  — максимальный и минимальный наружные диаметры;  $S_{min}$  — минимальная толщина стенки;  $R_m$ ,  $R_e$  — соответственно пределы прочности и текучести материала;  $p_m$ ,  $p_e$ ,  $p_y$  — давления на пределах прочности, текучести и устойчивости пластического деформирования; (значения соответствуют экспериментальным данным);  $\epsilon_m$ ,  $\epsilon_y$  — относительные деформации на пределе прочности и по условию устойчивого пластического деформирования;  $K_c$ ,  $K_m$  — исходные значения КС и после разрушения;  $\Delta K = K_m - K_c$ .

2. Разрушение баллона (продольная трещина) начинается в области минимальных толщин. Его источником является неглубокая (0,5... 0,7 мм) язва коррозионного происхождения. Этот вид коррозионные повреждения обнаруживается на всех баллонах.

3. В ряде случаев (3 из 8) минимальные толщины баллонов меньше допустимых [1, 2]. Однако это обстоятельство не оказывает заметного влияния на прочность объекта, поскольку запас прочности больше допускаемого [3, 9].

4. В двух случаях максимальные значения диаметра превышают допускаемые по нормативам [1, 2]. Само по себе это обстоятельство не является опасным, поскольку запас прочности для этих случаев также превышает допускаемый уровень.

5. Уровень экспериментальных пластических деформаций при разрушении находится в пределах 2,5... 3 % и лишь в одном случае достигает 5,65 %. Но и это значение значительно меньше теоретических значений пластической деформации, соответствующих потери устойчивости пластического деформирования. Создавшееся положение можно объяснить уменьшением запаса пластичности вследствие перегрузки баллона при нарушении регламента эксплуатации [10], а также значительной разнотолщинностью стенки корпуса, что приводит к локализации пластических деформаций.

6. Кроме основной трещины, по которой происходило разрушение баллона при разрушающих испытаниях под действием гидравлического давления, других трещин на внутренней поверхности корпуса не было, тогда как в случаях аварийного разрушения такие трещины обнаруживали. Указан-

ное обстоятельство можно объяснить сравнительно малой скоростью деформирования при гидротестированиях по сравнению со скоростью деформирования при взрыве [11].

7. Исходные значения КС максимальны в продольном направлении. Значения максимумов в различных точках одного баллона отличаются на 2... 2,5 А/см. При гидравлическом нагружении КС нарастает как в продольном, так и в поперечном направлении. При этом максимальными остаются ее значения в продольном направлении.

В нагруженном состоянии КС на 1... 1,5 А/см больше таковой в состоянии разгрузки, в отличие от одноосного растяжения, когда КС в разгруженном состоянии больше, чем в состоянии нагрузки. По мере увеличения нагрузки положение максимума КС меняется — он сдвигается в область минимальных толщин. После разрушения значения максимальной КС лежат в пределах 9,3... 10,8 А/см.

В случае удаления краски (зачистки поверхности) значения КС возрастают на 0,5... 1,0 А/см.

8. Расчетные значения давлений на пределе текучести систематически меньше (на 30–50 %) экспериментальных. Это может быть объяснено значительным разбросом значений толщины стенки корпуса, а также недостаточной чувствительностью методики измерения деформаций.

9. Предельные давления разрушения находятся в узком диапазоне между расчетными давлениями на пределе прочности и пределе устойчивости пластического деформирования. Давление на пределе устойчивости дает верхнюю, а на пределе прочности — нижнюю оценку давления разрушения (при этом погрешность не превышает 15 %).

## ВЫВОДЫ

1. Аварийные разрушения баллонов наступают в результате нарушения требований технологии их эксплуатации.

2. Существующие методы контроля не позволяют своевременно оценить возможность дальнейшей эксплуатации баллонов [3].

3. Целесообразно выполнять более полное техническое диагностирование объектов с замером толщин стенок, диаметров и КС на цилиндрической части баллонов.

1. *ТИ 227.ТР.ИТ-01-87*. Технологическая инструкция. Минво черн. металлургии. Жданов. металлург. комбинат. — Жданов, 1987. — 109 с.
2. *ГОСТ 943-73*. Баллоны стальные малой и средней емкости для газов на  $P_p \leq 20$  МПа.
3. *ДНАОП 0.00-1.07-94*. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, которые работают под давлением.

АО «УКРНИИХИММАШ»,  
Харьков

4. *Христенко И. Н., Кривова В. В.* Влияние пластических деформаций на коэрцитивную силу малоуглеродистой стали // Дефектоскопия. — 1984. — № 6. — С. 90–92.
5. *Долгийский В. М., Рязузов Д. Г., Новик В. Г.* О возможности контроля состояния металла по результатам измерения коэрцитивной силы // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2000. — № 4. — С. 65–67.
6. *ГОСТ 22762-77*. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости на пределе текучести вдавливанием шара.
7. *ГОСТ 22761-77*. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Бринелю переносными твердомерами статического действия.
8. *ДСТУ 4003-2000*. Сосуды и аппараты. Выбор параметров упрочняющей обработки.
9. *ГОСТ 14249-89*. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность.
10. *Нос М.* Бомба для предприятия // Охрана труда. — 2000. — № 1. — С. 21–22.
11. *Скоростное деформирование элементов конструкций* / Ю. С. Воробьев, А. В. Колодяжный, В. И. Севрюков, Е. Г. Янютин // Киев: Наук. думка, 1989. — 191 с.

Поступила в редакцию  
12.07.2001

УДК 261.438:534.647.083.8

# ДЕМОДУЛЯЦИЯ ПОМПАЖНЫХ КОЛЕБАНИЙ НАГНЕТАТЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ОГИБАЮЩЕЙ ЛОПАТОЧНОЙ ВИБРАЦИИ

Е. А. ИГУМЕНЦЕВ, В. А. ТАРГОНСКИЙ

В практике эксплуатации центробежных нагнетателей (ЦБН) на компрессорных станциях (КС) отмечены режимы работы с пульсациями потока газа, сопровождающиеся шумовым эффектом и вызывающие следующие явления: циклическое изменение направления потока газа через ЦБН и нагрузки привода, увеличение вибрации подшипников, корпуса нагнетателя и трубопроводов обвязки; изменение направления осевого усилия на ротор. Такой режим работы ЦБН назван помпажом. Его последствия, как правило, приводят к таким поломкам оборудования: разрушению упорного подшипника; увеличению зазоров в уплотнениях (лабиринтных, «масло-газ») и подшипниках скольжения; появлению трещин на рабочих лопатках и дисках ротора ЦБН, а также трещин элементов соединительной муфты и их износу. Помпаж иногда приводит к выходу из строя привода (газовой турбины или электродвигателя). Перечисленные последствия работы ЦБН в помпажном режиме наглядно демонстрируют необходимость оснащения агрегата современной и надежной противопомпажной защитой.

Неустойчивый режим работы ЦБН обусловлен в первую очередь изменением газодинамики потока газа на рабочих лопатках ротора. С уменьшением

расхода газа углы атаки потока газа на лопатки увеличиваются, и при достижении предельного значения происходит срыв потока, который обычно возникает у группы лопаток. При этом образуется вращающаяся срывная зона (предпомпажная), в которой происходит частичное или полное перекрытие каналов между лопатками (мягкий помпаж). При дальнейшем уменьшении расхода газа количество срывных зон увеличивается, происходит их слияние между собой. Когда они полностью перекрывают каналы между лопатками, наступает жесткий помпаж — при этом расход газа мгновенно снижается до нуля. Под воздействием давления на выходе ЦБН газ устремляется на вход, что приводит к реверсированию потока газа через рабочее колесо, и появляется первый помпажный толчок.

При создании противопомпажной защиты возникает проблема выбора методов анализа состояния потока газа, критериев оценки и информативных параметров для определения границ области неустойчивой работы ЦБН [1]. Наиболее распространенные противопомпажные системы построены на использовании универсальной напорно-расходной характеристики ЦБН. При этом измеряется расход и напор (степень повышения давления) газа, и по этим параметрам на напорно-расходной характе-

© Е. А. Игуменцев, В. А. Таргонский, 2001

Частота  $f$  визначається з умови

$$f = \frac{\Delta\varphi}{2\pi\Delta\tau}, \quad (8)$$

де  $\Delta\tau$  — абсолютна похибка вимірювання  $\tau$ .

Зрозуміло, що для досягнення необхідної точності вимірювання  $\tau$  потрібно збільшувати частоту  $f$ , що може привести до того, що не буде виконуватись умова (7). Тому при вимірюванні доволі великих значень повного фазового зсуву потрібно користуватись допоміжною частотою  $f_m$ , яка відповідає умові (7) та

$$f_1 < f_m < f. \quad (9)$$

Вимірювання виконується наступним чином. Визначають фазовий зсув  $\varphi_i$  на частоті  $f_i$ , а потім знаходять  $\varphi_m$  на частоті  $f_m$ . З виразу (6) вираховують кількість  $n_m$  цілих фазових циклів на частоті  $f_m$ :

$$n_m = E \left| \frac{\varphi_i f_m}{2\pi f_i} - \frac{\varphi_m}{2\pi} + 0,5 \right|. \quad (10)$$

Потім вимірюють фазовий зсув  $\varphi$  на частоті  $f$ , а далі за результатами вимірювання знаходять  $n$ :

$$n = E \left| \frac{f}{f_m} (n_m + \frac{\varphi_m}{2\pi}) - \frac{\varphi}{2\pi} + 0,5 \right|. \quad (11)$$

Для  $N$  шкал на  $k$ -й ступені перерахунку ( $k = N-1$ )

$$n_k = E \left| \frac{f_N}{f_k} (n_{k-1} + \frac{\varphi_k}{2\pi}) - \frac{\varphi_N}{2\pi} + 0,5 \right|. \quad (12)$$

В імпульсно-фазовому методі, щоб уникнути впливу інтерференції відбитого та випромінюваного імпульсів, тривалість зондуючого імпульса  $\tau_{zond}$  визначають з виразу

$$\tau_{zond} < \tau. \quad (13)$$

На низькій частоті  $f_1$  з врахуванням відношень (2), (4) та (13) тривалість  $\tau_{zond}$  повинна бути меншою одного періода частоти  $f_1$ . Пієзоелектричні перетворювачі (ПЕП), які використовуються в вимірювачах швидкості ультразвуку, при випромінюванні імпульса такої тривалості вносять значні спотворення, що приводить до неможливості проведення вимірювань  $\varphi_i$ . Окрім того, ПЕП мають найбільший коефіцієнт передачі, якщо збуджуюча частота співпадає з резонансною або близька до неї.

Щоб уникнути вищезначених обмежень, авторами пропонується використати частоти  $f_1$  та  $f_2$  ( $f_i$  визначається з формули (8)), які незначно відрізняються одна від іншої та близькі до резонансної частоти:

$$f_1 = f_2 + \Delta f. \quad (14)$$

Різниця  $\Delta f$  повинна відповідати умові однозначного вимірювання:

$$\varphi_\Delta = 2\pi\Delta f\tau < 2\pi, \quad (15)$$

тобто значення  $\Delta f$  буде дорівнювати значенню  $f_i$  з умови (4), але при цьому фазовий зсув не вимірюється, а визначається згідно

$$\Delta\varphi_{1-2} = \Phi_1 - \Phi_2 = 2\pi\tau(f_2 + \Delta f - f_2) = 2\pi\tau\Delta f, \quad (16)$$

де  $\Phi_1 = 2\pi f_1 \tau$ ;  $\Phi_2 = 2\pi f_2 \tau$ .

Слід пам'ятати, що значення повних фазових зсувів  $\Phi_1$  і  $\Phi_2$  можуть перевищувати  $2\pi$ , а існуючі фазометри вимірюють тільки значення  $\varphi_1$  та  $\varphi_2$ , які менше  $2\pi$ . Через те, що при розрахунку  $\Delta\varphi_{1-2}$  ми використовуємо  $\varphi_1$  і  $\varphi_2$ , величина  $\Delta\varphi_{1-2}$  може бути від'ємною і не відповідати дійсній різниці між  $\Phi_1$  і  $\Phi_2$ , тому при визначенні  $\Delta\varphi_{1-2}$  потрібно використати алгоритм

$$\Delta\varphi_{1-2} = \begin{cases} \varphi_1 - \varphi_2, & \varphi_1 - \varphi_2 \geq 0, \\ \varphi_1 - \varphi_2 + 2\pi, & \varphi_1 - \varphi_2 < 0. \end{cases} \quad (17)$$

Таким чином, замість низької частоти  $f_1$  ми можемо використати різницю частот  $f_1$  та  $f_2$ , а замість  $\varphi_1 - \Delta\varphi_{1-2}$ .

Кількість  $n$  визначається згідно виразу

$$n = E \left| \frac{\Delta\varphi_{1-2} f_1}{2\pi(f_1 - f_2)} - \frac{\varphi_1}{2\pi} + 0,5 \right|, \quad (18)$$

де  $\Delta\varphi_{1-2}$  — різниця фазових зсувів на частотах  $f_1$  та  $f_2$ ,  $\varphi_1$  — фазовий зсув на частоті  $f_1$ . Для того, щоб вірогідність аномальної похибки була мінімальною, потрібно виконати умову

$$E \left| \frac{\Delta(\varphi_1 - \varphi_2) f_1}{2\pi(f_1 - f_2)} - \frac{\Delta\varphi_1}{2\pi} + 0,5 \right| = 0, \quad (19)$$

де  $\Delta(\varphi_1 - \varphi_2)$  — різниця похибок вимірювання  $\varphi_1$  та  $\varphi_2$ ;  $\Delta\varphi$  — похибка вимірювання фазового зсуву на частоті  $f_1$ .

Якщо вона не виконується, потрібно використати допоміжну частоту  $f_3$ :

$$f_1 - f_2 < f_1 - f_3 < f_1. \quad (20)$$

При цьому вибір різниці між частотами  $f_1$  та  $f_3$  повинен відповідати виразу (19), тобто, цей вибір відповідає вибору допоміжної частоти  $f_m$  згідно умови (9). Аналогічно формулі (18)  $n_2$  знаходимо з виразу

$$n_2 = E \left| \frac{\Delta\varphi_{1-2}(f_1 - f_3)}{2\pi(f_1 - f_2)} - \frac{\Delta\varphi_{1-3}}{2\pi} + 0,5 \right|, \quad (21)$$

а  $n$  — аналогічно формулі (11):

$$n = E \left| \frac{f_1}{f_1 - f_3} (n_2 + \frac{\Delta\varphi_{1-3}}{2\pi}) - \frac{\varphi_1}{2\pi} + 0,5 \right|. \quad (22)$$

Для  $N$  шкал на  $k$ -й ступені перерахунку

$$n_k = E \left| \frac{f_1 - f_k}{f_1 - f_{k+1}} (n_k + 1 + \frac{\Delta\varphi_1 - k}{2\pi}) - \frac{\Delta\varphi_{1-(k+1)}}{2\pi} + 0,5 \right|. \quad (23)$$

Але при використанні ПЕП зміна частоти в широких межах приводить до зменшення коефіцієнту перетворення. Авторами пропонується використати роботу ПЕП на непарних гармоніках основної резонансної частоти (при незначному зменшенні коефіцієнта перетворення [5]), що значно розширює можливості методу.

1. В. М. Родюшкин. Об ультразвуковом методе выявления микротрещин // Дефектоскопия. — 1999. — № 8. — С. 54-58.
2. Темнев Г. С. К вопросу о выборе параметров многошкальных измерительных систем // Радиотехника и электроника. — 1965. — 10, № 9. — С. 1710-1712.

3. *Скрытник Г. И., Серова А. А., Атаев Д. И.* О надежности устранения многозначности фазовых измерений // Радиотехн. и электроника. — 1968. — **13**, № 10. — С. 1753–1761.
4. *Применение методов фазометрии для прецизионного измерения расстояний* / С. М. Маевский, В. Г. Баженов, Е. К.

Батуревич, Ю. В. Куц // Киев: Виц. шк. Изд-во при Киев. ун-те, 1983. — 84 с.

5. *Домаркас В. И., Кажис Р.-И. Ю.* Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи. — Вильнюс: Изд-во «Минтис», 1974. — 258 с.

Нац. техн. ун-т України «КПІ»,  
Київ

Надійшла до редакції  
02.02.2001

УДК 621.14.179

## АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ ВЛИЯНИЕМ ЗАЗОРА, ПРИ ВИХРЕТОКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ КОЭФФИЦИЕНТА АНИЗОТРОПИИ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ

В. Г. РЫБАЧУК

Помимо интегрального значения удельной электрической проводимости (УЭП), т. е. усредненного по некоторому объему и направлениям, важную информацию о структуре неферромагнитного материала несут также параметры, характеризующие ее анизотропию. И хотя соответствующие методы неразрушающего контроля еще не получили повсеместного распространения, они, безусловно, представляют значительный интерес при решении таких важных задач вихретоковой структуроскопии, как, например, контроль напряженного состояния [1, 2] и анизотропии физико-механических свойств (твердости, пределов прочности и текучести, относительной деформации и т. д.), возникающей вследствие прокатки, прессования или других технологических процессов [3]. Параметром, который объективно характеризует степень анизотропии УЭП материала и является наиболее удобным для практического применения, есть коэффициент анизотропии. Он равен отношению абсолютных значений главных компонент тензора УЭП или отношению их разности к абсолютному значению одной из компонент, обычно меньшей [3, 4]. В случае одноосной анизотропии УЭП в плоскости, параллельной поверхности контролируемого материала, коэффициент анизотропии определяется выражением [3]

$$k_{\sigma} = (\sigma_y - \sigma_x) / \sigma_x,$$

где  $\sigma_x, \sigma_y$  — значения УЭП вдоль осей  $x$  и  $y$  декартовой системы координат, ориентированных вдоль главных осей анизотропии.

В работе [5] получены выражения, описывающие составляющие вектора напряженности магнитного поля вихревых токов, возбуждаемых круглой индукционной катушкой с ферромагнитным сердечником, питаемой гармоническим током, в неферромагнитной пластине с одноосной электрической

анизотропией. Анализ этих выражений, проведенный в работе [6], позволил выявить характерные параметры поля вихревых токов, которые несут информацию об анизотропии УЭП. Такими параметрами являются разности амплитуд  $\Delta H_r$  и  $\Delta H_z$ , и разности фаз  $\Delta Y_r$  и  $\Delta Y_z$  соответственно радиальной

$\dot{H}_r$  и нормальной  $\dot{H}_z$  составляющих, измеренных в точках на поверхности пластины, равноудаленных от центра возбуждающей катушки и разнесенных на угол  $\pi/2$  по угловой координате  $\varphi$  (отсчитывается в направлении, противоположном ходу часовой стрелки, от оси  $x$ , совпадающей с направлением минимального значения УЭП). Выражения, описывающие их, приведены в работе [6].

Кроме того, в качестве информативных параметров при измерении коэффициента анизотропии УЭП можно также использовать амплитуду угло-

вой составляющей  $\dot{H}_{\varphi}$  поля вихревых токов при  $\varphi = \pi/4$  (или кратных этому значению) или ее фазу — будем обозначать эти информативные параметры

как  $|\dot{H}_{\varphi}|_{\varphi=\pi/4}$  и  $\Psi_{\varphi}$ . В последнем случае измерения можно проводить при произвольном значении  $\varphi$ , так как в пределах каждого квадранта угловой ко-

ординаты фазы  $\dot{H}_{\varphi}$  постоянна. Однако бóльшая точность измерений достигается при максимальной амплитуде [6].

Исследование указанных информативных параметров позволило установить, что они являются квазилинейными функциями коэффициента анизотропии в диапазоне изменений последнего 0...10 % [6]. Однако при этом было установлено, что чувствительности как амплитудных, так и фазовых информативных параметров сильно зависят от обобщенного параметра  $\chi = \omega \mu_0 \sigma_x a T / 2$  ( $\omega$  — частота возбуждающего поля;  $\mu_0$  — магнитная пос-



форматорного датчика линейных перемещений 5 и хромель-копелевых термопар 6. Сварку образцов проводили на установке с использованием ультразвукового генератора 8, выходную мощность  $P_{эл}$  которого плавно регулируют в пределах 50... 430 Вт и контролируют ваттметром 9 типа А-410. Управление установкой осуществляется с помощью микропроцессора 7, а обработку сигналов — блока 11. Контроль рабочей частоты  $f$ , времени сварки  $t$  и проковки  $t_{пр}$  производили соответственно с помощью частотомера 10 типа ДЗ14 и таймеров 14 и 15. Запись значений основных параметров и их производных по времени осуществляли посредством светолучевого (типа НОЗЗА) и запоминающего (типа С1-13) осциллографов.

Предварительно проведенные эксперименты показали, что только 25 % сварных образцов имеют одинаковые показатели качества шва (остаточную толщину, отсутствие прожогов, выплесков и т. п.). Для повышения стабильности результатов предложен следующий цикл сварки. Включение ультразвуковых колебаний производят на стадии установившейся деформации зоны сварки, а их выключение — в момент времени  $t_{выкл}$ , что соответствует началу роста электрической мощности  $P_{эл}$ , потребляемой колебательной системой сварочной установки (рис. 2). Разработанный технологический цикл позволил повысить стабильность результатов сварки практически до 98 % при варьировании в широком интервале амплитуды колебаний волновода (25... 45 мкм) и сварочного усилия (100... 450 Н). При этом охлаждение образцов на стадии проковки осуществляли в режиме, близком к изотермическому, а точность поддержания температуры на заданном уровне составляла  $\pm 1^\circ\text{C}$ .

Фоторентгенограммы исследуемых образцов в больших и малых углах были получены в  $\text{CuK}\alpha$ -излучении в плоскокассетной камере, при этом ось волокон ПКА была перпендикулярной к первичному пучку. Угловое распределение интенсивности излучения в больших углах измеряли на рентгеновском дифрактометре ДРОН-2.0, а малоугловое рассеивание исследовали в камере КРМ-1М.

Плотность материала сварного шва определяли методом градиентных труб, который базируется на использовании принципа флотационного равновесия образца в столбике жидкости с определенным градиентом плотности.

Рассмотрим результаты рентгенодифракционных исследований. На рис. 3 приведено схематическое изображение фоторентгенограмм в больших углах, полученных от исходных волокон ПКА (рис. 3, а) и наиболее характерных сварных сое-

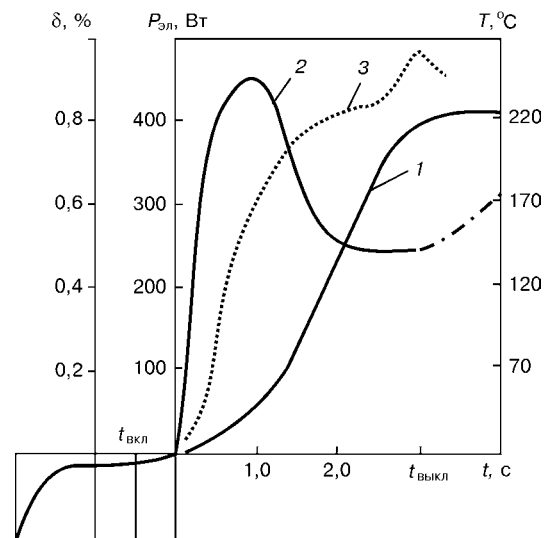


Рис. 2. Зависимость деформации  $\delta$  (1), электрической мощности  $P_{эл}$  (2) и температуры  $T$  (3) в зоне шва при УЗС волокон ПКА.

динений, структура которых формировалась при различных температурных режимах (рис. 3, б-г). Температура кристаллизации  $T_{кр}$  для указанных случаев соответственно равна  $-94$ ,  $20$  и  $200^\circ\text{C}$ .

На фоторентгенограмме (рис. 3, а) исходных волокон наблюдаются два четких рефлекса (200) и (002, 202) на нулевой слоевой линии, которые соответствуют кристаллической структуре  $\alpha$ -модификации [6]. Незначительная азимутальная протяженность этих рефлексов свидетельствует о достаточно высокой степени ориентации кристаллитов относительно оси волокна.

На рис. 3, б-г видно, что характерной особенностью всех фоторентгенограмм сварных соединений является появление на них колец изотропной интенсивности. Этот факт указывает на то, что в процессе УЗС волокон произошло лишь частичное их оплавление. При этом часть расплавленного материала переходит из анизотропного в изотропное состояние. Результат перекристаллизации полимера в зоне сварки зависит от степени переохлаждения расплава. Так, в частности, значительное переохлаждение ( $T_{кр} = -94^\circ\text{C}$ ) переводит расплав в стеклообразное состояние, и дальнейшее формирование кристаллической фазы происходит при ограниченной подвижности сегментов макромолекул, что в свою очередь приводит к появлению кристаллитов гексагонального типа с ротационными нарушениями в расположении молекулярных цепей. У них обнаруживается несколько укороченный период идентичности вдоль оси цепи по сравнению с полностью вытянутой, что указывает на наличие

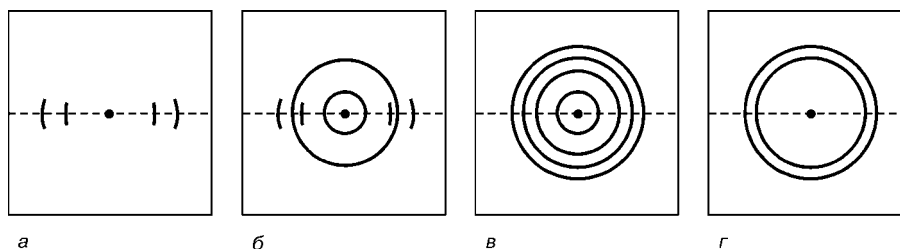


Рис. 3. Схематическое изображение фоторентгенограммы исходных и сварных волокон ПКА: а — исходный; б-г — сварные образцы.

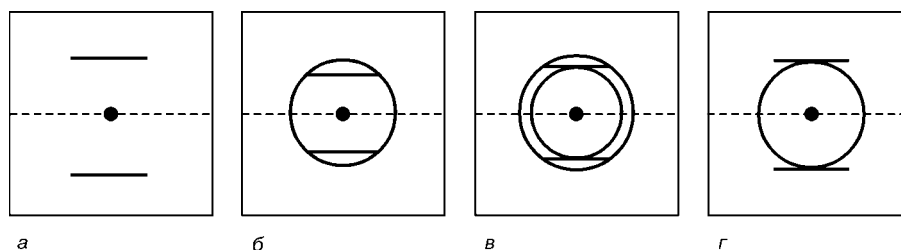


Рис. 4. Малоугловые рентгенограммы исходных и сварных волокон ПКА: а — исходный; б-г — сварные образцы.

$\gamma$ -модификации ПКА. Перекристаллизация полимера при температурах, близких к температуре плавления ( $T_{кр} = 200^\circ\text{C}$ ), обуславливает возникновение наиболее равновесной структуры кристаллитов  $\alpha$ -модификации, о чем свидетельствует появление на рентгенограмме (рис. 3, з) двух концентрических колец, угловое расположение которых совпадает с положением рефлексов (200) и (002, 200). При промежуточных температурах переохлаждения расплава возможны случаи одновременного наличия в изотропном состоянии кристаллитов  $\alpha$ - и  $\gamma$ -модификаций ПКА, что объясняется различными тепловыми условиями для внутренних и внешних участков сварного соединения (рис. 3, в).

На основании анализа полученных фоторентгенограмм можно сделать вывод, что материал термопластических полимеров в зоне шва представляет собой самоармированную композиционную систему. Ее матрица формируется в процессе перекристаллизации той части материала, которая была расплавлена действием ультразвуковых колебаний, и представляет собой изотропный полимер, т. е. не имеет преимущественного направления в ориентации молекулярных цепей. Армирующими элементами такой композиционной системы являются остатки исходных волокон, которые в процессе УЗС претерпели структурные изменения, характерные для процесса отжига ориентированных систем в условиях изотермического режима.

Информацию о надмолекулярном уровне организации исследуемых образцов получали методом малоугловой рентгеновской дифракции. Полученные малоугловые фоторентгенограммы схематически изображены на рис. 4.

На фоторентгенограмме исходных волокон ПКА (рис. 4, а) обнаруживается только один рефлекс в виде штриха. Его наличие на меридиане рентгеног-

раммы характерно для высокоориентированных волокон линейных полимеров, которые способны кристаллизоваться. Рентгенограмма соответствует фибриллярной надмолекулярной структуре, специфической особенностью которой является внутренняя микрогетерогенность, т. е. вдоль фибриллы имеет место регулярное чередование кристаллических и аморфных областей различной плотности. Интенсивность малоуглового рентгеновского рефлекса зависит от квадрата разности электронных плотностей кристаллической и аморфной фаз [7]. Угловое положение максимума интенсивности ( $\varphi_{max}$ ) определяет значение большого периода  $d$ , которое вычисляют по формуле  $d = \lambda / \varphi_{max}$ , где  $\lambda$  — длина волны рентгеновского излучения (для  $\text{CuK}\alpha^- \lambda = 1,54 \text{ \AA}$ ), а  $\varphi_{max}$  определяется после отделения диффузного рассеяния.

Исправленный большой период  $c = dx_m$  представляет собой сумму среднестатистических длин в направлении фибриллы одного кристаллита и одного межкристаллитного аморфного слоя;  $x_m$  определяли по методике, предложенной Цванкиным [5].

На всех малоугловых фоторентгенограммах сварных соединений наблюдаются добавочные рефлексы в виде колец изотропной интенсивности, количество которых всегда отвечает числу находящихся в данном образце полиморфных модификаций. Этот экспериментальный факт дает возможность сделать важный вывод:  $\alpha$ - и  $\gamma$ -кристаллические модификации входят составными элементами в различные надмолекулярные образования. Отсутствие в них преимущественного направления ориентации структурных элементов (кристаллитов) позволяет предположить, что такими надмолекулярными образованиями могут быть сферолиты. Дополнительная информация о микрогетерогенной структуре полимера может быть получена из анализа распределения интенсивности излучения в меридиональном направлении малоугловой рентгенограммы  $I(\varphi)$  (рис. 5).

Прежде всего следует отметить, что в том случае, когда в сварном соединении присутствуют кристаллиты обеих полиморфных модификаций  $\alpha$  и  $\gamma$ , на кривой  $I(\varphi)$  проявляются два максимума интенсивности (рис. 5, кривая 3). Угловое положение первого максимума отвечает значению  $\varphi_{max}$  для исходных волокон ПКА, а положение второго максимума соответствует большим углам по отношению к первому. Это указывает на то, что первый максимум следует отнести к армирующим элементам сварного соединения (оплавленным по поверхности ориентированным волокнам), а второй — к матрице об-

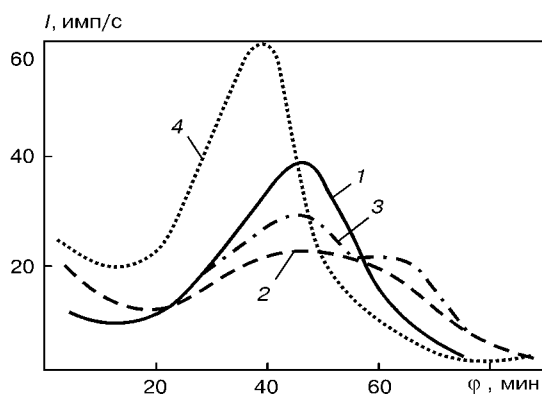


Рис. 5. Распределение интенсивности излучения в направлении меридиана малоугловой рентгенограммы сварных образцов ПКА: 1-4 — образцы а-г (рис. 4).

**Параметры микрогетерогенной структуры образцов исходных волокон ПКА и их сварных соединений**

Вид образца	$T_{кр}, ^\circ C$	$c, \text{Å}$	$a, \text{Å}$	$l, \text{Å}$	$k, \%$
Волокна ПКА	—	92	61	31	66
Сварные соединения	-94	90	59	31	66
—»—	-34	90	58	32	64
—»—	20	90	60	30	66
—»—	80	90	61	29	66
—»—	140	111	76	35	69
—»—	200	136	99	37	73

разованного композита, кристаллиты которого имеют структуру  $\gamma$ -модификации. В том случае, когда матрица содержит кристаллиты  $\alpha$ -модификации, рассеяние от армирующих элементов накладывается на рассеяние матрицей, и разделить их невозможно. Формирование сварного соединения при температуре  $T_{кр} = 200^\circ C$  приводит к заметному увеличению интенсивности малоуглового рефлекса и смещению углового положения максимума интенсивности к меньшим углам, что характерно для изменений в большепериодной структуре ориентированных полимеров при отжиге в условиях изометрического режима.

Анализ меридионального профиля малоуглового рефлекса по методике, предложенной в [7], позволил определить параметры микрогетерогенной структуры исследуемых образцов (таблица).

Приведенные в таблице данные относятся к армирующим элементам сварного соединения. Видно, что при  $T_{кр} = 200^\circ C$  происходит рекристаллизация полимера внутри армирующих элементов сварного соединения. Размеры кристаллитов  $\alpha$ -модификации рассчитаны как средние эффективные значения и значительно меньше ( $\sim 41-44 \text{ Å}$ ) в сравнении с кристаллитами  $\alpha$ -модификации.

Таким образом, в процессе УЗС тканых поликапроамидных материалов происходят сложные структурные переходы на молекулярном и надмолекулярном уровнях, которые необходимо учиты-

вать при разработке технологии сварки таких материалов, особенно режима охлаждения.

**ВЫВОДЫ**

1. Выявлено, что формирование надмолекулярной структуры в зоне УЗС тканых термопластичных материалов происходит в процессе рекристаллизации исходной высокоориентированной структуры полимеров, вследствие чего материал в зоне шва представляет собой самоармированную композиционную систему.

2. Показано, что на совершенство и стабильность надмолекулярных образований в зоне сварного шва существенно влияют как технологические параметры УЗС (амплитуда колебаний волновода, сварочное усилие), так и режим охлаждения шва в процессе проковки, поскольку именно от них зависит механизм кристаллизации полимера и, как следствие, тип образующейся полиморфной модификации полимера.

1. Волков С. С., Черняк Б. Я. Сварка пластмасс ультразвуком. — М.: Химия, 1989. — 256 с.
2. Нестеренко Н. П. Особенности дозирования механической энергии при ультразвуковой сварке полиолефинов // Межд. конф. «Сварка и родственные технологии — в XXI век» (Киев, ноябрь 1998): Тез. докл. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1998. — С. 80.
3. Мозговой И. В. Основы технологии ультразвуковой сварки полимеров. — Красноярск: КГУ, 1991. — 280 с.
4. Черняк Л. В. Исследования свойств сварных соединений полиэтилентерефталатных тканей, полученных ультразвуковой сваркой акустическими и рентгенографическими методами // Новые разработки по сварке и склеиванию пластмасс: Сб. науч. тр. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1989. — С. 44-51.
5. Каргин В. А., Слонимский Г. Л. Краткие очерки по физикохимии полимеров. — М.: Химия, 1967. — 232 с.
6. Ганцюра Т. П. Исследование структурных переходов в кристаллизующихся ориентированных полимерах методом малоугловой рентгеновской дифракции: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. — Киев, 1983. — С. 16.
7. Каргин В. А. Структура и механические свойства полимеров. — М.: Наука, 1979. — 451 с.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАНУ, Киев  
Киев. нац. ун-т им. Т. Шевченко,

Поступила в редакцию  
15.05.2001

# ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ МАГНИТНЫХ, КОНТАКТНОПОДВИЖНЫХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОДСИСТЕМ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМАХ

Ю. Т. ГУЗ

В статье описана возможность, которая позволяет не снимая корпуса реле и не нарушая герметичности электромагнитных изделий аналитически описать упругие свойства контактных элементов и возвратной пружины. Алгоритм решения базируется на анализе динамических свойств переходного процесса тока в обмотке исследуемого объекта.

Уравнение динамики электромагнитов клапанного типа (с поворотным якорем) в общем случае могут быть записаны так:

$$u = iR + d\psi/dt, \quad (1) \quad \psi = f(i, \phi), \quad (2)$$

$$J \frac{d^2\phi}{dt^2} + Q(i, \phi) \frac{d\phi}{dt} + M_{пр}(\phi) = M_s, \quad (3)$$

где  $u$  — мгновенное значение напряжения;  $R$  — полное омическое (активное) сопротивление всей цепи;  $J$  — момент инерции якоря;  $Q(i, \phi)$  — коэффициент линейного (скоростного) трения, пропорциональный первой степени скорости. Этот коэффициент является в общем случае функцией двух переменных, а именно  $i$  и  $\phi$ ;  $M_{пр}(\phi)$  — противодействующий момент, являющийся функцией  $\phi$ . Этот момент зависит от упругих свойств контактных пружин и возвратной пружины;  $t$  — текущее время.

Решение уравнений динамики электромагнитов обычно сводится к определению функций  $i(t)$ ,  $\psi(t)$  и  $\phi(t)$  при заданном напряжении  $u(t)$ .

Задачу определения состояния контактной, подвижной, электрической и магнитной систем в условиях эксплуатации и ремонта целесообразно решать так, чтобы не нарушать герметичности пространства внутри корпуса реле. При таких условиях доступными для регистрации параметрами (без доработки конструкции реле специальными датчиками и измерительными устройствами) протекающих в реле динамических процессов, являются:

- ток в обмотке возбуждения;
- переходные сопротивления контактов;
- виброударные процессы при включении и выключении реле.

Рассмотрим задачу об определении параметров противодействующего момента  $M_{пр}(\phi)$ . Здесь важно рассмотреть два практически значимых случая.

Первый случай линейной электромагнитной системы, т.е. такой, когда реле работает на линейном участке первоначальной кривой намагничивания стали сердечника. В этом случае  $Q(i, \phi) = \text{const}$  и уравнения динамики электромагнита записываются следующим образом:

$$u(t) = iR + d\psi/dt, \quad (4) \quad \psi(t) = C i/\phi_0 - \phi, \quad (5)$$

$$J \frac{d^2\phi}{dt^2} + Q \frac{d\phi}{dt} + M_{пр}(\phi) = \frac{\Psi^2}{2C}, \quad (6)$$

где  $C$  — конструктивный коэффициент электромагнита, который поддается расчету или экспериментальному определению по подлежащей разработке методике.

© Ю. Т. Гуз, 2001

Решим уравнение (4) относительно магнитного потока сцепления  $\psi$ , допустив  $u = \text{const}$ ,

$$d\psi = (u - iR)dt,$$

откуда

$$\psi = \int (u - iR)dt. \quad (7)$$

Подставив в (5) выражение для  $\psi$  из (7) и решив (5) относительно  $\phi$ , получим

$$\phi = \phi_0 - \frac{Ci}{\int (u - iR)dt}. \quad (8)$$

Определим первую и вторую производные по времени от угла поворота якоря

$$\frac{d\phi}{dt} = -C \frac{\frac{di}{dt} \int (u - iR)dt - i(u - iR)}{\left[ \int (u - iR)dt \right]^2}, \quad (9)$$

$$\frac{d^2\phi}{dt^2} = -C \frac{\left\{ \frac{d^2i}{dt^2} \int (u - iR)dt + \frac{di}{dt} (u - iR) \frac{di}{dt} (u - iR) + iR \frac{di}{dt} \right\}}{\left[ \int (u - iR)dt \right]^4} \dots$$

$$\dots \frac{\left[ \int (u - iR)dt \right]^2 - \left\{ \frac{di}{dt} \int (u - iR)dt - i(u - iR) \right\}}{\left[ \int (u - iR)dt \right]^4} \dots$$

$$\dots \frac{2 \int (u - iR)dt (u - iR)}{\left[ \int (u - iR)dt \right]^4} =$$

$$= C \frac{2 \left[ \int (u - iR)dt \right]^2 (u - iR) \frac{di}{dt} - (u - iR)^2 i \int (u - iR)dt - \left\{ \frac{di}{dt} \left[ \int (u - iR)dt \right]^3 + iR \frac{di}{dt} \left[ \int (u - iR)dt \right]^2 \right\}}{\left[ \int (u - iR)dt \right]^4} \dots$$

Из уравнения (6) выразим  $M_{пр}(t)$  с учетом  $d\phi/dt$  и  $d^2\phi/dt^2$  из вновь полученного выражения для электромагнитного момента

$$M_s = \frac{\left[ \int (u - iR)dt \right]^2}{2C}, \quad (11)$$

$$M_{пр}(t) = \frac{\Psi^2}{2C} - J \frac{d^2\phi}{dt^2} - Q \frac{d\phi}{dt}, \quad (12)$$

$$M_{пр}(t) = \frac{\left[ \int (u - iR)dt \right]^2}{2C} + QC \frac{\frac{di}{dt} \left( \int (u - iR)dt - i(u - iR) \right)}{\left[ \int (u - iR)dt \right]^2} -$$

$$- 2JC \frac{\left\{ \left[ \int (u - iR)dt \right]^2 (u - iR) \frac{di}{dt} - (u - iR) i \int (u - iR)dt \right\}}{\left[ \int (u - iR)dt \right]^2} -$$

$$-\frac{\left\{ \frac{d^2 i}{dt^2} \int (u - iR) dt \right\}^2 + iR \frac{di}{dt} \int (u - iR) dt \right\}}{\left[ \int (u - iR) dt \right]^2} \quad (13)$$

Таким образом, зная  $J, Q$  закон изменения тока  $i(t)$  в обмотке электромагнита, например, в период движения якоря, т.е. в период времени  $\Delta t = t_{уд} - t_{тр}$  по уравнению (13) можно построить зависимость противодействующего движению момента от времени.

Воспользовавшись уравнением (8), можно построить зависимость изменения угла поворота якоря  $\varphi$  от времени  $\varphi(t)$ .

Поскольку нас интересует зависимость противодействующего момента от координаты якоря  $\varphi - M_{пр}(\varphi)$ , можно воспользоваться следующим приемом:

в полученных зависимостях  $M_{пр}(t)$  и  $\varphi(t)$  при их совместной обработке можно исключить время  $t$  и в результате получить искомую зависимость  $M_{пр}(\varphi)$ . Аналогичным приемом можно получить зависимости  $i(\varphi), \psi(\varphi)$ .

Зависимость тока в обмотке возбуждения от времени  $i(t)$  может быть получена экспериментально при включении либо выключении реле постоянного тока. Если эта зависимость (график) может быть аппроксимирован аналитическим выражением, например, степенным рядом

$$i(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \dots + a_n t^n,$$

то можно определить первую

$$\frac{di(t)}{dt} = a_1 + 2a_2 t + 3a_3 t^2 + \dots + n a_n t^{n-1}$$

и вторую производные тока по времени

$$\frac{d^2 i(t)}{dt^2} = 2a_2 + 6a_3 t + \dots + n(n-1)a_n t^{n-2}.$$

Подставляя полученное выражение для производных в (13) и помня о том, что при включении  $u = \text{const}$ , можно получить аналитическую зависимость  $M_{пр}(t)$ .

Ввиду сложности аналитического выражения для тока представляется целесообразным практически решить уравнение (13) численными методами (дифференцирования и интегрирования). Теперь в (13) неопределенные интегралы  $\int (u - iR) dt$  следует заменить

на определенные вида  $\int_{t_{уд}}^{t_m} (u - iR) dt (u - iR) dt$ , где  $t_{уд}$  — время трогания якоря;  $t_{уд}$  — время удара якоря о носик сердечника.

Для исследования электромагнитных процессов при шунтировании обмотки возбуждения электромагнита уравнение (1) приводится к виду

$$d\psi/dt = -iR, \quad (14)$$

а выражение для электромагнитного момента принимает вид

$$M_{\Delta}^0(t) = \left[ \int iR dt \right]^2 / 2C. \quad (15)$$

Таким образом, получены выражения для динамического электромагнитного момента в период движения при включении и выключении, а также момента противодействующих сил в зависимости от времени. Зная зависимости  $\varphi(t)$  и  $M_{пр}(t)$ ,  $M_{\Delta}^B(t)$ ,  $M_{\Delta}^0(t)$  можно,

исключая время как параметр получить зависимости  $M_{\Delta}^B(\varphi)$ ,  $M_{\Delta}^0(\varphi)$  и  $M_{пр}(\varphi)$ .

Безусловно верно то, что для нормально работающего реле между характеристиками

$$M_{\Delta}^B(\varphi), M_{пр}(\varphi), M_{\Delta}^0(\varphi) \text{ и } M_{пр}(\varphi)$$

должны выполняться определенные соотношения, например, типа неравенств:

$$\left[ M_{\Delta}^B(\varphi) - M_{пр}(\varphi) \right]_{\varphi = \varphi_1 \dots \varphi_n} \geq 0, \quad (16)$$

$$\left[ M_{пр}(\varphi) - M_{\Delta}^0(\varphi) \right]_{\varphi = \varphi_1 \dots \varphi_n} \geq 0. \quad (17)$$

Исследование выполнения неравенств типа (16) и (17), по нашему мнению, целесообразно проводить на автоматизированном комплексе. В случае нелинейной электромагнитной системы для определения  $M_{пр}$  необходимо решить систему трех нелинейных уравнений (1)–(3). Зависимости тока в обмотке возбуждения, магнитного потокосцепления и угла поворота якоря для периодов трогания, движения и покоя определяются по вышеприведенным выражениям, причем погрешность решения расхождения с экспериментальными результатами не превышает 1,5 %, что для нелинейной электротехники следует считать очень хорошим результатом. Из этих уравнений можно определить первую и вторую производные угла поворота якоря и зависимость  $Q(i, \psi)$ , а из уравнения (3) получить зависимость

$$M_{пр}(t) = M_{\Delta}(t) - J \frac{d^2 \varphi}{dt^2} - Q(i, \psi) \frac{d\varphi}{dt}. \quad (18)$$

Выражение  $M_{\Delta}(t)$  следует получить из уравнения

$$M_{\Delta}(t) = \frac{dW_{\Delta}}{d\varphi} \frac{d\varphi}{dt}, \quad (19)$$

где  $W_{\Delta}$  — полная энергия всей электромагнитной системы.

В свою очередь, полную энергию  $W_{\Delta}$  можно определить по формуле

$$W_{\Delta} = \int_{i_1}^{i_2} id\psi = \int_{t_1}^{t_2} i(u - iR) dt, \quad (20)$$

или же, зная реализацию  $i(t)$  и  $\psi(t)$ , для вычисления можно воспользоваться следующей приближенной формулой

$$\int_{i_1}^{i_2} id\psi \approx \sum_{k=1}^n i_{cp,k} \Delta\psi_k. \quad (21)$$

Здесь  $i_{cp,k}$  — среднее значение тока в  $k$ -м интервале  $\Delta\psi_k$ . Тогда уравнение (18) принимает вид

$$M_{пр}(t) = \frac{i}{d\varphi} \frac{d\varphi}{dt} - J \frac{d^2 \varphi}{dt^2} - Q(i, \psi) \frac{d\varphi}{dt}. \quad (22)$$

Здесь, как и ранее в линейном случае, зная  $M_{пр}(t)$  и  $\varphi(t)$ , можно построить зависимости  $M_{\Delta}^B(\varphi)$  и  $M_{\Delta}^0(\varphi)$ , и, сравнивая их с  $M_{пр}(\varphi)$ , прийти к заключению о состоянии электромагнитного реле в некоторой части характеризующих его параметров.

1. Ройзен В. З. Электромагнитные малогабаритные реле. — Л.: Энергоатомиздат, — 1986. — 252 с.
2. Азароняц Р. А. Электромагнитные элементы технической кибернетики. — М., Наука, 1972. — 277 с.