

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА и НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

№ 2, 2002

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

Издаётся с января 1989 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА

ГЕЛЬМАН Л. М. Диагностика сигналов: сравнение использования обеих компонент преобразования Фурье и спектральной плотности мощности	3
КОРОЛЕВ В. П., ВОЛКОВА И. А., ШЕЛИХОВА Е. В. Экспертное диагностирование коррозионного разрушения при определении остаточного ресурса строительных металлоконструкций в коррозионных средах	6
ДАВЫДОВ Е. А., ДЯДИН В. П., КУЗЬМИН В. В. Некоторые аспекты диагностики слоисто-водородного повреждения нефтехимического оборудования	11
СОКОЛИНСКАЯ И. Г. О возможности прогнозирования и повышения надежности машин и механизмов по результатам магнитной структуро-скопии деталей	17
ГЕЛЬМАН Л. М., ЗИНЬКОВСКИЙ Ю. Ф., ПЕТРУНИН И. В. Диагностика усталостных трещин: использование новых признаков, основанных на преобразование Фурье	21

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

ТРОИЦКИЙ В. А. Особенности неразрушающего контроля и диагностики строительных сооружений	24
ГАРФ Э. Ф., ДЫСКИН Э. М., ЮХИМЕЦ П. С. Статистический анализ качества сварных монтажных соединений при производстве опорных блоков морских стационарных платформ	30
РАДЫШ Ю. В., КИРЕЕВ А. С. Полномасштабная математическая модель состояния металлоконструкций в условиях эксплуатации	33
ПОСЫПАЙКО Ю. Н. Контроль герметичности сварных соединений изделий с многослойной стенкой. 2. Выбор способов контроля герметичности и создание оборудования для их исследования	37
БОНДАРЕНКО А. Ю. Об оценке остаточного ресурса сварных соединений магнитным методом для обеспечения качества сварных конструкций и изделий	42
КОЗЛОВСКИЙ А. А., ОРЛОВИЧ А. Е., СЕРЕБРЕННИКОВ С. В. Автоматизированная система прогнозирования разрушающих атмосферных нагрузок на элементы конструкций воздушных линий электропередач	46
КОЛБИН И. Б., ГОРБЕНКО В. Н., ТОЛЧИЙ М. М. О необходимости внесения измерений в документы, устанавливающие порядок проведения ультразвукового контроля	49

ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ

Выставки и конференции в Украине	53
Конференція «Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів»	54
НПФ «Ультракон» — 10 лет	55
«ПРОМЫШЛЕННЫЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ 2002» — подведение итогов	56
Научно-технический семинар «Повышение эксплуатационной надежности линейной части магистральных газопроводов газотранспортной системы Украины»	58
Назарчуку Зіновію Теодоровичу — 50 років	60

РЕКЛАМА

Журнал издается при содействии:

Технического комитета по стандартизации «Техническая диагностика и неразрушающий контроль»



Украинского общества неразрушающего контроля и технической диагностики

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор

Б. Е. ПАТОН

А. Я. Недосека (зам. гл. ред.),
В. А. Троицкий (зам. гл. ред.)
З. А. Майдан (отв. секр.),
И. П. Белокур,
Ю. К. Бондаренко,
В. Л. Венгринович, Э. Ф. Гарф,
А. А. Грузд, Ю. Б. Дробот,
Н. Н. Зацепин, В. И. Иванов,
О. М. Карпаш, В. В. Клюев,
Л. М. Лобанов, А. А. Лебедев,
В. К. Лебедев, Г. Г. Луценко,
Н. В. Новиков, Е. С. Переображен,
П. П. Прохоренко, В. П. Радько,
В. Н. Учинин, 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/rwj

Научные редакторы

Ю. Н. Посыпайко, А. А. Грузд

Редактор

Г. В. Ольшевская

Электронная верстка

И. С. Баташева, И. Р. Наумова,
Н. Н. Приймащенко,
И. В. Петушкин

Свидетельство

о государственной регистрации
КВ 4787 от 09.01.2001

Журнал входит в перечень
утверждённых ВАК Украины
изданий для публикаций трудов
исследователей ученых степеней

Перепечатка материалов из жур-
нала «ТД и НК» возможна при обя-
зательном письменном согласова-
нии с редакцией журнала

При перепечатке материалов ссылка
на журнал «ТД и НК» обязательна

За содержание рекламных мате-
риалов редакция журнала ответст-
венности не несет

TECHNICAL DIAGNOSTICS and NON-DESTRUCTIVE TESTING

Nº 2, 2002

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

GELMAN L. M. Signal diagnostics: comparison of using both components of Fourier transformation and spectral power density	3
KOROLYEV V. P., VOLKOVA I. A., SHELIKHOVA E. V. Expert diagnostics of corrosion fracture in determination of residual life of building metal structures in corroding media	6
DAVYDOV E. A., DYADIN V. P., KUZMIN V. V. Some aspects of diagnostics of lamellarhydrogen damage of petrochemical equipment	11
SOKOLINSKAYA I. G. On the possibility of forecasting and improving the reliability of machines and mechanisms by the results of magnetic structuroscopy of parts	17
GELMAN L.M., ZINKOVSKY Yu.F., PETRUNIN I.I. Diagnostics of fatigue cracks: use of new indices based on Fourier transformation	21

NON-DESTRUCTIVE TESTING

TROITSKY V. A. Features of non-destructive testing and diagnostics of building constructions	24
GARF E. F., DYSKIN E. M., YUKHIMETS P. S. Statistical analysis of quality of erection welded joints in fabrication of off-shore platform supports	30
RADYSH YU. V., KIREEV A. S. Full-scale mathematical model of the state of metal structures under the conditions of service	33
POSYPAIKO Yu. N. Control of tightness of welded joints in products with a multi-layer wall. 2. Selection of the methods of tightness control and development of equipment for their investigation	37
BONDARENKO A. Yu. On evaluation of the residual life of welded joints by the magnetic method to ensure the quality of welded structures and products	42
KOZLOVSKY A. A., ORLOVICH A. E., SEREBRENNIKOV S. V. Automated system of forecasting the breaking atmospheric loads on structural elements of power transmission lines	46
KOLBIN I. B., GORBENKO V. N., TOPCHII M. M. On the need to make changes in documents, establishing the procedure of ultrasonic testing	49

NEWS AND INFORMATION

Exhibitions and conferences in Ukraine	
Conference on «Physical methods and means of monitoring the media, materials and products»	53
10th anniversary of SPF «Ultrakon»	54
«Industrial Non-Destructive Testing» — summing up	56
Scientific-Technical Seminar «Improvement of service reliability of the line part of the main gas pipelines of gas transportation system of Ukraine»	58
Nazarchuk Zinovij Teodorovich is 50	60
ADVERTISING	61

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. Karpass,
V. V. Klyuev, L. M. Lobanov,
A. A. Lebedev, V. K. Lebedev,
G. G. Lutsenko,
N. V. Novikov, E. S. Pereverzov,
P. P. Prokhorchenko, 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. Zatsepin,
A. V. Shimanovsky

Address:

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

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

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

Scientific editors
Yu. N. Posypaiko, A. A. Gruz

Editor G. V. Olshevckay

Electron gallery
I. R. Naumova,
N. N. Priymachenko,
I. V. Petushkov

State Registration Certificate
KV 4787 of 09.01.2001



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

Л. М. ГЕЛЬМАН

Обобщен новый подход к формированию диагностических признаков, который использован для диагностики гауссовых сигналов и заключается в одновременном использовании двух новых диагностических признаков: действительной и мнимой составляющих преобразования Фурье с учетом статистических зависимостей между признаками. Доказано, что спектральная плотность мощности сигналов представляет только частный случай обобщенного подхода. Установлено, что предложенный подход обеспечивает существенный выигрыш в эффективности диагностики по сравнению с подходом, основанным на спектральной плотности мощности.

A new approach has been generalized to form diagnostic parameters that was used for diagnostics of Gaussean signals and consists in a simultaneous use of two new diagnostic parameters, namely actual and imaginary components of Fourier transform, taking into account the statistical dependencies between the parameters. The suggested generalization improves the effectiveness of diagnostics. A fast Fourier transform is considered that represents the frequency-time method. It is shown that the spectral power density of the signals is not a diagnostic parameter and is just a particular case of the generalized approach.

Новый подход к формированию диагностических признаков был предложен для случаев, когда одно- или многомерные преобразования Фурье применяют для технической диагностики и распознавания образов. Он состоит в использовании одновременно двух новых диагностических признаков: действительной и мнимой компонент преобразования Фурье. Показано [1], что такой подход является более общим, чем подходы, основанные на спектральной плотности мощности и фазовом спектре, и обеспечивает более высокую эффективность диагностики, чем подход, основанный на спектральной плотности мощности.

Учет статистических зависимостей между диагностическими признаками может повысить [3–5] эффективность диагностики. Поэтому для реализации предложенного подхода необходим учет статистических зависимостей между действительной и мнимой компонентами преобразования Фурье.

Однако в известной литературе [1] сравнение эффективности новых признаков и спектральной плотности мощности произведено без учета статистических зависимостей между новыми признаками. Цель настоящей статьи — использование указанного подхода [1] для диагностики гауссовых сигналов с учетом статистических зависимостей между предложенными признаками, а также сравнение диагностической эффективности этого подхода и основанного на спектральной плотности мощности.

Теоретический анализ. Рассмотрим двухклассовую диагностику стационарных гауссовых центрированных сигналов $X(t)$ с различными дисперсиями $\sigma_x^2 = \sigma_{xj}^2$ и идентичными нормированными автокорреляционными функциями $R_{X0} = R_{X1} = R_X$ для гипотез H_j при $j = 0, 1$. Диагностическая информация содержится в коротком преобразовании Фурье на частоте ω . Предлагаемый подход заключается в одновременном использовании действительной X_R и мнимой X_I компонент короткого преобразования Фурье на частоте ω_x как диагностических признаков:

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

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

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

Коэффициент взаимной корреляции между признаками, определяемыми соотношениями (1), (2), учитывая стационарность сигналов, может быть представлен следующим образом:

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

Используя новую переменную $\sigma = t_2 - t_1$, после изменения порядка интегрирования между переменными σ и t_1 и интегрирования по t_1 найдем окончательное выражение

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

С учетом этой формулы, а также выражения [6] для среднеквадратичных отклонений σ_R и σ_I соответственно компонент X_R и X_I запишем после преобразований нормированный коэффициент взаимной корреляции между диагностическими признаками X_R и X_I в виде

$$r_{RI} = \frac{\int_0^T r_x(\tau) [\cos \omega \tau - \cos \omega(2T - \tau)] d\tau}{2 \sqrt{\left[\int_0^T r_x(\tau) (A - B) d\tau \right] \left[\int_0^T r_x(\tau) (A + B) d\tau \right]}}, \quad (5)$$

где $A = \omega(T - \tau) \cos \omega \tau$, $B = \sin \omega \tau$.



Выражения (4), (5) новые и носят общий характер. Они получены для произвольных стационарных сигналов и учитывают следующие важные параметры сигналов и короткого преобразования Фурье: нормированную автокорреляционную функцию сигналов, дисперсию и длительность сигналов, частоту преобразования Фурье. Из этих выражений следует, что в общем случае для короткого преобразования Фурье коэффициент взаимной корреляции между новыми признаками, описываемыми соотношениями (1), (2), не равен 0. Поэтому следует учитывать корреляцию между указанными диагностическими признаками при принятии решений о состоянии объектов диагностики. Из выражения (5) найдем, что для идентичных нормированных автокорреляционных функций сигналов для гипотез H_j нормированный коэффициент взаимной корреляции между диагностическими признаками, определяемыми соотношениями (1), (2), также идентичен для гипотез H_j , т. е. $r_{Rj_0} = r_{Rj_1} = r$. Так как сигналы $X(t)$ гауссовские, то ввиду линейности преобразований по формулам (1), (2) получим, что двумерная условная функция распределения указанных признаков также гауссовская. Воспользовавшись этой функцией распределения, получим после преобразований отношение правдоподобия предложенных признаков в форме

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

где

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

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

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

Воспользовавшись данными [6], получим

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

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

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

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

Далее оценим и сравним диагностическую эффективность признаков, представленных соотношениями (1), (2), и признака согласно выражению (9), используя при этом критерий Фишера [8]

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

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

где σ^2 , m — операторы соответственно дисперсии и математического ожидания.

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

$$F_0 = 1 - \frac{2}{b + 1/b}, \quad (12) \quad F_1 = F_0/G, \quad (13)$$

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

где $b = \sigma_{x1}^2/\sigma_{x0}^2$ — параметр, характеризующий различие дисперсий сигналов для гипотез H_j ; G — выигрыш в эффективности диагностики; a — параметр, характеризующий различие дисперсий диагностических признаков согласно выражениям (1), (2).

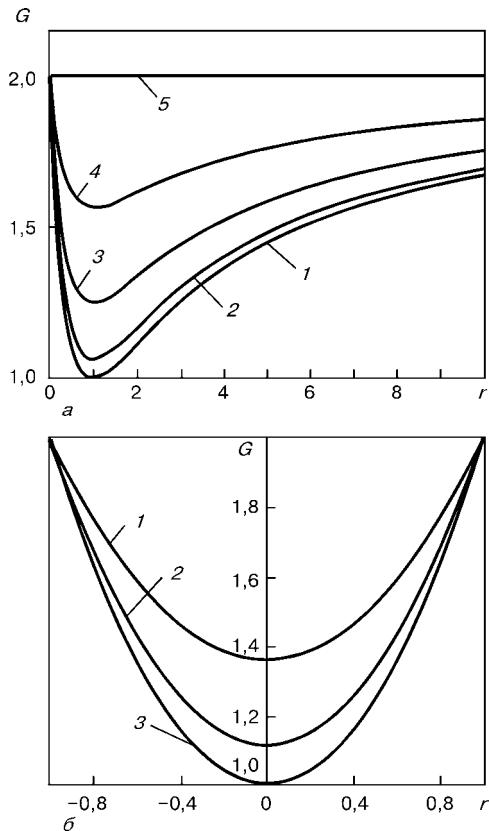
В случае идентичных нормированных автокорреляционных функций сигналов для диагностируемых гипотез H_j , воспользовавшись данными [6], получим $a = \sigma_{R0}/\sigma_{I0} = \sigma_{R1}/\sigma_{I1}$.

Из выражений (12)–(14) находим: 1) диагностическая эффективность новых признаков зависит только от различия дисперсий сигналов для диагностируемых гипотез H_j и не зависит от коэффициента взаимной корреляции между признаками и параметра a , так как предлагаемый подход учитывает взаимную корреляцию между признаками и различие дисперсий признаков; 2) диагностическая эффективность признака, основанного на спектральной плотности мощности, зависит как от различия дисперсий сигналов для диагностируемых гипотез H_j , так и от коэффициента взаимной корреляции между признаками из выражений (1), (2) и параметра a . Диагностическая эффективность этого признака уменьшается при увеличении модуля коэффициента взаимной корреляции между признаками из выражений (1), (2) и увеличении значения параметра a от 1, так как подход, основанный на спектральной плотности мощности, не учитывает взаимную корреляцию между признаками и различие дисперсий признаков.

Согласно формуле (14) выигрыш G в эффективности диагностики возрастает при движении параметра a от 1 (см. рисунок) для любых значений нормированных коэффициентов взаимной корреляции признаков. Оценим, как влияет учет статистических зависимостей между признаками, определяемыми соотношениями (1), (2), на эффективность диагностики, используя следующий критерий:

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

где F_2 — критерий Фишера для отношения правдоподобия S_2 , полученного без учета статистичес-



Зависимость выигрыша G : а — от параметра a при $r = 0$ (1); 0,25 (2); 0,5 (3); 0,75 (4); б — от параметра r при $a = 0,25$; 4 (1); 0,5; 2 (2); 1 (3)

ких зависимостей между признаками, описываемых выражениями (1), (2):

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

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

$$S_2 = A_1 X_R^2 + B_1 X_R^2 + D,$$

$$A_1 = A(r = 0), B_1 = B(r = 0).$$

Используя соотношения (1), (2), (8), (12), (15), (16), после преобразований получим

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

Отсюда следует, что учет статистических зависимостей между предложенными диагностическими признаками повышает эффективность диагностики. Критерий (17), характеризующий это повышение, обусловленное учетом статистических зависимостей признаков, возрастает с ростом модуля коэффициента взаимной корреляции между признаками, определяемыми выражениями (1), (2).

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрена диагностика стационарных гауссовских сигналов на основе одновременного использования новых обобщенных признаков: действительной и мнимой

составляющих преобразования Фурье; при этом учитывались статистические зависимости между указанными диагностическими признаками.

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

3. Показано, что учет статистических зависимостей между предложенными признаками повышает эффективность диагностирования. Критерий, характеризующий повышение эффективности, обусловленное учетом статистических зависимостей признаков, увеличивается с ростом модуля коэффициента взаимной корреляции между признаками.

4. В общем случае для рассматриваемой диагностики спектральная плотность мощности не является оптимальным диагностическим признаком и представляет частный случай отношения правдоподобия предлагаемых новых признаков. Использование спектральной плотности мощности оптимально, если одновременно коэффициент взаимной корреляции между новыми признаками равен 0, а дисперсии этих признаков одинаковы.

5. Применение предлагаемых признаков обеспечивает выигрыш в эффективности диагностики по сравнению с использованием спектральной плотности мощности при произвольных значениях коэффициента взаимной корреляции между предлагаемыми признаками и параметра, характеризующего различие дисперсий признаков (за исключением случая, упомянутого в п. 4). Выигрыш возрастает при увеличении модуля коэффициента взаимной корреляции между признаками, а также при движении значения параметра a , характеризующего различие дисперсий признаков, от 1.

Поэтому мы рекомендуем использовать одновременно действительную и мнимую компоненты преобразования Фурье как наиболее базисные диагностические признаки, особенно если коэффициент взаимной корреляции между признаками не равен 0, а дисперсии компонент преобразования Фурье не равны между собой.

1. Gelman L. M., Braun S. G. The optimal usage of the Fourier transform for pattern recognition // Mech. Syst. and Signal Processing. — 2001. — **15**, № 3. — P. 641–645.
2. Gelman, L. M., Braun S. G., Petrunin I. V. The optimal usage of the Fourier transform for condition monitoring and diagnostics // Proc. of the Internat. conf. on condition monitoring, Swansea, UK, 2001. — P. 350–357.
3. Bilmes J. A. Maximum mutual information based reduction strategies for cross-correlation based joint distributional modeling // Proc. of the Internat. conf. on acoustics, speech and signal processing, Seattle, 1998. — P. 469–472.
4. Fukunaga K. Introduction to statistical pattern recognition. — New York: Academic Press, 1990.
5. Devijver P. A., Kittler J. Pattern recognition: a statistical approach. — Prentice Hall, 1982.
6. Gelman L. M., Sadowaya V. G. Optimization of the resolving power of a spectrum analyzer when detecting narrowband signals // Telecommunications and Radio Engineering. — 1980. — **35**, № 11. — P. 94–96.
7. Kammler D. W. A first course in Fourier analysis. — New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 2000.
8. Young T. Y., Fu K.-S. Handbook of pattern recognition and image processing. — Academic Press, Inc., 1986.



ЭКСПЕРТНОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ КОРРОЗИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА СТРОИТЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ В КОРРОЗИОННЫХ СРЕДАХ

В. П. КОРОЛЕВ, И. А. ВОЛКОВА, Е. В. ШЕЛИХОВА

Показан методологический подход, используемый при определении остаточного ресурса строительных металлоконструкций, эксплуатируемых в коррозионных средах. Рассмотрены показатели диагностирования, оцениваемые путем статистического моделирования с учетом установленного уровня вероятности безотказной работы.

A procedural approach is demonstrated that is used to determine the residual life of building metal structures, operating in corrosion media. Considered are the diagnostic characteristics, evaluated by statistical simulation, taking into account the established level of probability of no-failure operation.

Снижение надежности и долговечности строительных металлоконструкций вследствие коррозионного разрушения является одной из важнейших причин возникновения предаварийных и аварийных состояний как самих конструкций, так и зданий и сооружений в целом [1, 2]. По данным экспертных оценок, на сегодняшний день в Украине эксплуатируется около 36 млн т несущих металлических конструкций, введенных в эксплуатацию в основном в 1960–1980 гг. Коррозионное разрушение является одним из основных недостатков строительных металлоконструкций, для устранения которого требуются дополнительные затраты материальных ресурсов. В Украине и других странах СНГ потери

от коррозии составляют 10...15 % всего производимого черного металла или 4...5 % национального дохода [3]. Проблема предотвращения коррозионного разрушения является важной составной частью комплексной задачи повышения надежности и долговечности строительных металлоконструкций. Вместе с этим отказы промышленного оборудования в результате коррозионного износа приводят к экономическим потерям, которые нередко соизмеримы со стоимостью основных фондов, а также необратимым экологическим последствиям.

Совершенствование методов экспертного диагностирования металлических конструкций [4], эк-

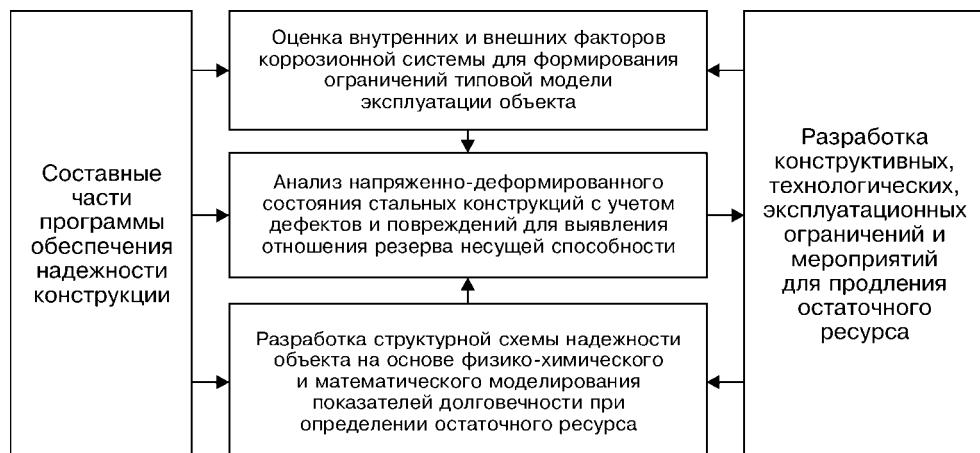


Рис. 1. Мониторинг технического состояния конструкций в коррозионных средах при продлении остаточного ресурса

Таблица 1. Степени коррозионной агрессивности режима эксплуатации

Степень агрессивности режима эксплуатации	Показатель коррозионной стойкости K , мм/год	Нормативное значение коррозионных потерь стали С235 $A_n(L, G, S)$, г/м ² ·год	Степень агрессивности по СНиП 2.03.11-85
Неагрессивная	До 0,01	До 78,5	Неагрессивная
Слабоагрессивная	Св. 0,01 до 0,05	Св. 78,5 до 392,5	Слабоагрессивная
Низкоагрессивная	Св. 0,05 до 0,15	Св. 392,5 до 1177,5	Среднеагрессивная
Среднеагрессивная	Св. 0,15 до 0,30	Св. 1177,5 до 2355,0	»»
Высокоагрессивная	Св. 0,30 до 0,50	Св. 2355,0 до 3925,0	»»
Сильноагрессивная	Св. 0,50	Св. 3925,0	Сильноагрессивная



Таблица 2. Коэффициент надежности по воздействию коррозионных сред

Категория размещения конструкций	Коэффициент γ_{fk} при воздействии среды					
	Неагрессивной	Слабоагрессивной	Низкоагрессивной	Среднеагрессивной	Высокоагрессивной	Сильноагрессивной
На открытом воздухе	1,05	1,10	1,15	1,20	1,20	1,25
Под навесом	1,00	1,10	1,10	1,15	1,15	1,20
Внутри помещений						
неотапливаемых	1,00	1,05	1,10	1,10	1,15	1,15
отапливаемых	1,00	1,00	1,05	1,05	1,10	1,10

сплуатирующихся за нормативным сроком службы, связано с разработкой системы мониторинга технического состояния в коррозионных средах [5, 6] при продлении остаточного ресурса (рис. 1). Сбор и обработка информации о состоянии объекта в процессе эксплуатации, разработка расчетно-экспериментальных методов повышения надежности и долговечности ведет к корректировке программы обеспечения надежности (ПОН), определяющей расчетные ситуации при оценке резервов несущей способности конструкций. Оценка и обоснование продления остаточного ресурса требует качественного и количественного анализа параметров коррозионных воздействий в расчетах на коррозионную стойкость и долговечность.

Степень коррозионной агрессивности режима эксплуатации устанавливают для конкретных объектов в зависимости от макроклиматического района, категории размещения конструкций по ГОСТ 15150-69, характера технологических выделений и материала конструктивных элементов зданий и сооружений. По условиям эксплуатации конструкции различают следующие воздействия: ат-

мосферные климатологические; агрессивных газов; жидких неорганических и органических сред; твердых сред (грунтов, солей, аэрозолей, пыли).

Изменчивость коррозионных воздействий учитывается путем определения наиболее неблагоприятного сочетания экстремальных значений факторов окружающей среды. Состав и степень агрессивности воздействий следует принимать для однородных зон эксплуатации промышленных и гражданских объектов по данным технологической документации или результатам экспериментальных замеров на действующих объектах. Факторы коррозионной агрессивности классифицируются по шести степеням коррозионной агрессивности, приведенным в табл. 1.

Основной характеристикой агрессивных сред является нормативное значение коррозионных потерь $A_n(L, G, S)$ незащищенной малоуглеродистой стали класса C235 с учетом заданной продолжительности воздействий жидких (L), газообразных (G), твердых (S) сред.

Расчетное значение коррозионных потерь $A(L, G, S)$ определяют с помощью зависимости

$$A(L, G, S) = \gamma_q A_n(L, G, S) \gamma_{fk}, \quad (1)$$

где $\gamma_q = \tau(L, G, S)/\tau_0$ – коэффициент продолжительности воздействий, представляющий отношение продолжительности воздействия коррозионно-активных компонентов в часах $\tau(L, G, S)$ к среднему числу часов в году τ_0 ; γ_{fk} – коэффициент надежности по воздействиям, зависящий от степени агрессивности и категории размещения конструкций (табл. 2).

Таблица 3. Требования к показателям надежности противокоррозионной защиты по критериям предельных состояний для отношения резерва надежности $\Phi/N = 1$

Конструктивные и эксплуатационные характеристики по СНиП 2.03.11-85			Расчетные значения γ_{zn}/γ_{zk} при сроке службы T_n , год			
Степень коррозионной агрессивности среды (СКАС)	Способы первичной защиты конструкции	Методы вторичной защиты (МВЗ)	10	30	50	100
СКАС 1	Углеродистые и низколегированные стали без вторичной защиты	МВЗ 1	— 0,99	— 0,99	— 0,98	— 0,95
СКАС 2	Атмосферостойкие без вторичной защиты	МВЗ 2	— 0,99	— 0,96	— 0,94	— 0,91
	Углеродистые и низколегированные с ЛКП	МВЗ 1.2	0,97 0,99	0,86 0,99	0,77 0,98	0,74 0,99
СКАС 3	Углеродистые и низколегированные оцинкованные	МВЗ 1.1	0,99 0,99	0,95 0,99	0,92 0,98	0,91 0,95
	Углеродистые и низколегированные с ЛКП	МВЗ 1.2	0,89 0,99	0,88 0,98	0,84 0,95	0,83 0,90
СКАС 4	Углеродистые, низколегированные, оцинкованные с ЛКП	МВЗ 1.3	0,95 0,99	0,90 0,98	0,92 0,95	0,92 0,90
	Углеродистые и низколегированные с ЛКП	МВЗ 1.2	0,86 0,98	0,89 0,95	0,89 0,90	0,88 0,85
СКАС 5	Углеродистые, низколегированные, оцинкованные с ЛКП	МВЗ 1.3	0,92 0,98	0,93 0,95	0,91 0,90	0,93 0,85
	Углеродистые и низколегированные с ЛКП	МВЗ 1.2	0,85 0,95	0,87 0,90	0,88 0,85	0,91 0,80

Примечания: 1. Степень коррозионной агрессивности среды принимается по рекомендациям раздела СНиП 2.03.11-85.
2. Способы, средства и методы противокоррозионной защиты определять по рекомендациям приложений 14, 15 СНиП 2.03.11-85.

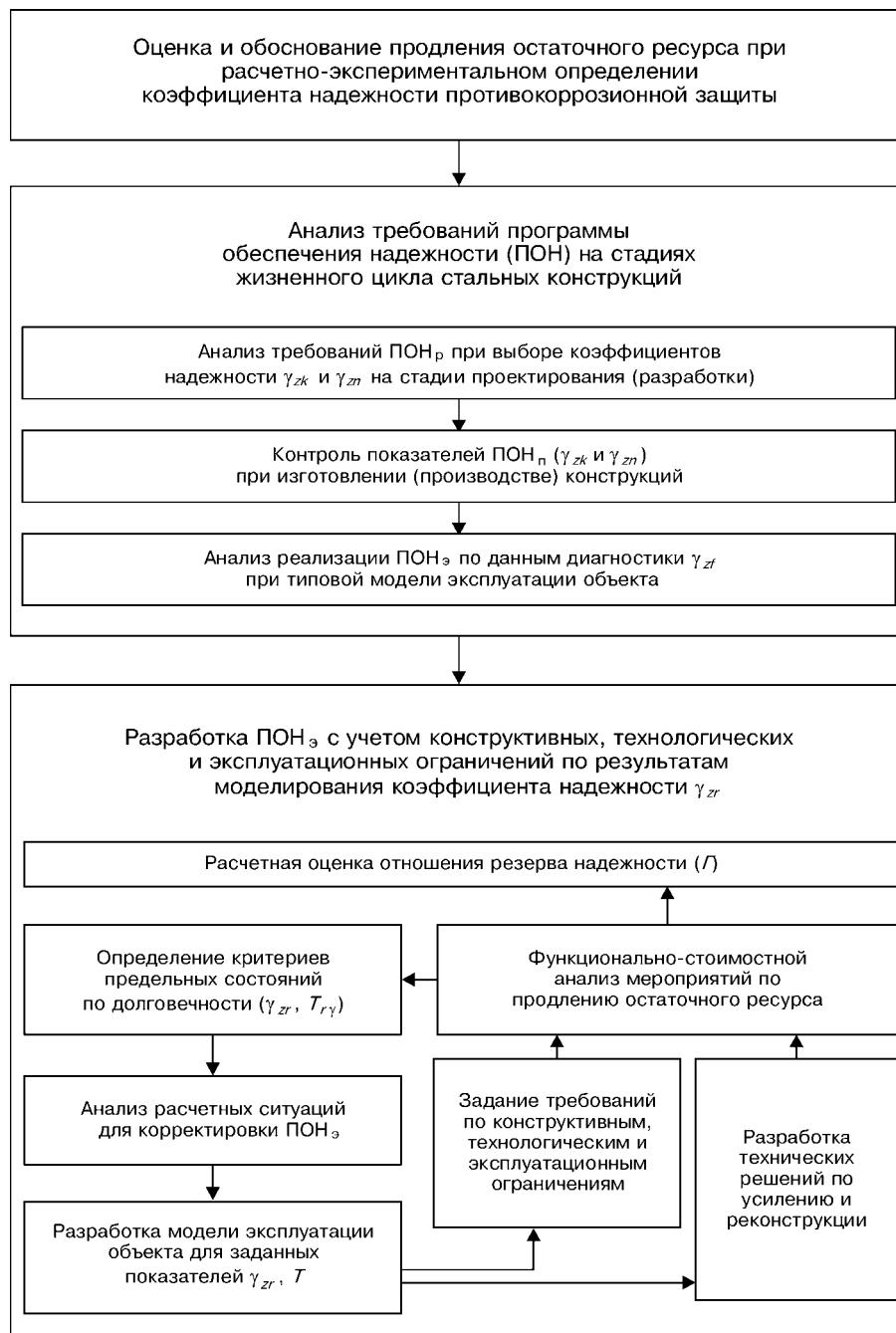


Рис. 2. Логическая схема определения остаточного ресурса на основе признаков предельных состояний

Параметры коррозионной агрессивности атмосферы и режима эксплуатации конструкции устанавливаются по следующим характеристикам: продолжительности общего увлажнения поверхности; продолжительности увлажнения поверхности фазовой пленкой влаги, а также адсорбционной пленкой влаги; концентрации коррозионно-активных компонентов.

Расчетное определение остаточного ресурса на основе признаков предельных состояний производится с целью установления срока службы T_{ry} при заданной доверительной вероятности в порядке, определенном на рис. 2. Требования к показателям долговечности первичной и вторичной противокоррозионной защиты устанавливаются в зависимости от срока эксплуатации по табл. 3. При этом ис-

пользуются заданные характеристики коэффициента надежности противокоррозионной защиты γ_{zk} по показателю коррозионной стойкости (первичная защита) и коэффициенту надежности противокоррозионной защиты γ_{zn} по гарантированной долговечности (вторичная защита).

Расчет на коррозионную стойкость с учетом мер первичной и вторичной защиты производится по первой и второй группам предельных состояний, связанных с потерей несущей способности и ограничением чрезмерных деформаций. Расчет показателей долговечности связан с ограничениями состояния вторичной защиты, затрудняющими нормальную эксплуатацию в агрессивных средах. Условия, определяющие показатели надежности:

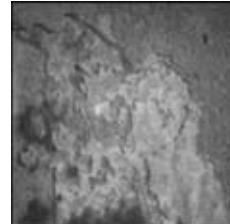


Таблица 4. Показатели диагностирования при продлении остаточного ресурса стальных конструкций в коррозионных средах

Наименование	Обозначение	Характеристики, необходимые для обоснования ПД				
		A_k	Γ	β	T_d	δ
Коэффициент надежности противокоррозионной защиты по данным контроля технического состояния	γ_{zf}	—	×	×	—	×
Коэффициент надежности противокоррозионной защиты при разработке ПОН _з	γ_{zr}	×	×	—	—	×
Остаточный ресурс объекта диагностирования	T_{ry}	×	×	—	×	×
Вероятность безотказной работы	P_r	—	×	×	—	×

Примечание: β — индекс надежности; T_d — оптимальная периодичность диагностирования, год; δ — предельная экспериментальная ошибка оценки геометрических характеристик и механических свойств с учетом нормального закона распределения случайных величин.

Таблица 5. Результаты оценки показателей диагностирования стальных конструкций объектов Ясиновского КХЗ

Объект диагностирования	Общий вид	Характеристика степени агрессивности режима эксплуатации $A(L, G, S)$, г/ m^2 ·год	γ_{zr}	Остаточный ресурс конструкции T_{ry} , год
Пролетное строение эстакады цеха сероочистки		5200...6100	0,14	2,1...1,7
Опора трубопроводов цеха ректификации		3400...4000	0,22	20,1...15,8
Листовые конструкции резервуара в цехе газопередачи		5600...6200	0,09	1,4...1,2
Опорный узел стропильной конструкции эстакады коксо-вого цеха		4400...5000	0,19	5,7...4,8

I предельное состояние

$$T_{by} \geq (1 - \gamma_{zn}) T_3, \quad (6)$$

$$\Phi/N + (1 - \gamma_{zh}) \leq \Gamma, \quad (2)$$

$$(1 - \gamma_{zn}) A(L, G, S) T_n^c \leq m t (1 - \frac{1}{\Gamma}), \quad (3)$$

$$\gamma_{zf} - \frac{1}{\Gamma} = \gamma_{zr}. \quad (4)$$

II предельное состояние

$$T_{3y} \geq \gamma_{zn} T_3, \quad (5)$$

$$T_{ry} = \left(\frac{m t \gamma_{zr}}{A_k} \right)^{1/c}, \quad (7)$$

где Γ — отношение резерва надежности; Φ — предельное усилие, которое может воспринять рассчитываемый элемент, кН; N — наибольшее расчетное усилие в конструктивном элементе, кН; $A(L, G, S)$ — характеристика степени агрессивности режима эксплуатации, г/ m^2 ·год; c — коэф-



фициент кинетики коррозионного износа; t — приведенная толщина сечения элемента, см; $m = \rho \cdot 10^4$ — переводной коэффициент коррозионных потерь; γ_{zk} — коэффициент надежности, противокоррозионной защиты, устанавливаемый при обосновании методов первичной защиты; T_n — нормативный срок службы конструкции; γ_{zr}, γ_{zn} — коэффициент надежности, устанавливающий предельный уровень коррозионных потерь при дальнейшей нормальной эксплуатации с учетом результатов оценки коррозионного состояния и для заданной системы вторичной защиты при типовой модели эксплуатации; T_z — нормативный срок службы защитных покрытий, год; T_{γ} — гарантированный срок службы защитных покрытий с доверительной вероятностью $\gamma = 0,95$, год; $T_{\gamma\gamma}$ — гамма-процентный срок восстановления противокоррозионной защиты, год; T_r — остаточный срок службы без дополнительных мер на противокоррозионную защиту и усиление; A_k — расчетное сопротивление коррозионному воздействию конструктивного элемента, $A_k = A(L, G, S)\alpha_f \gamma_{mk}$; γ_{mk} — коэффициент надежности по материалу при оценке степени агрессивности воздействий; α_f — конструктивный коэффициент, учитывающий неравномерность коррозионного разрушения; ρ — плотность металла, г/см³.

Возможные отклонения геометрических характеристик сечения и свойств материала в неблагоприятную сторону от их проектных значений, установленных способами и методами первичной и вторичной защиты, при нарушении условий нормальной эксплуатации учитываются коэффициентом надежности противокоррозионной защиты γ_{zf} [7].

Структура показателей диагностирования (ПД) и характеристик, необходимых для обоснования показателей диагностирования при экспертном определении остаточного ресурса, представлена в табл. 4.

Статистические характеристики изменения геометрических размеров сечений и расчетных свойств

материала с учетом характера и интенсивности коррозионных повреждений определяются с помощью визуального контроля и инструментальных методов (ультразвуковой толщинометрии, ультразвуковой и магнитопорошковой дефектоскопии, а также измерения твердости).

Указанный методический подход реализован для оценки остаточного ресурса стальных конструкций объектов Ясиновского КХЗ (табл. 5). Математические модели систем, характеризующих режим эксплуатации этих объектов, установлены по параметрам технического состояния конструкций и характеристикам внешних воздействий. Статистическое моделирование результатов экспертного диагностирования коррозионного состояния конструкций (γ_{zf}) позволяет производить оценку показателей диагностирования (γ_{zr}, T_r) с учетом установленного уровня вероятности безотказной работы P_r .

1. Проценко К. І. Попередження аварійного стану промислових та цивільних об'єктів і споруд // Тр. Первої Всеукр. науч.-техн. конф. «Аварії зданий і сооружень і их предупреждение». — Київ, 1997. — 266 с.
2. Шимановський В. М. Чи перетвориться Україна на новий Армагеддон? // Київські Відомості. — 1999. — 10 січня. — С. 8–9.
3. Горюхов Е. В., Королев В. П. Диагностика и оценка остаточного ресурса строительных металлоконструкций в коррозионных средах // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1998. — № 3. — С. 57–59.
4. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций. — Киев: Индпром, 1998. — 640 с.
5. Moran G. S. Corrosion monitoring in industrial plants using non-destructive testing and electrochemical methods. — Philadelphia: ASTM, 1986.
6. Parkin R. N. Life prediction of corrodible structure. — Houston: NACE, 1994. — Р. 1670.
7. Королев В. П., Толстяков Р. Г. Структура диагностических параметров в расчетах стальных конструкций на коррозионные воздействия // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1999. — № 3. — С. 56–59.

Донбас. гос. академия строительства и архитектуры,
Макеевка

Поступила в редакцию
23.01.2002



НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ДИАГНОСТИКИ СЛОИСТО-ВОДОРОДНОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ НЕФТЕХИМИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Е. А. ДАВЫДОВ, В. П. ДЯДИН, В. В. КУЗЬМИН

Рассмотрены характерные особенности слоисто-водородного растрескивания корпусов нефтехимического оборудования, изготовленного из низколегированных сталей. Представлены некоторые результаты практических случаев повреждений, полученных на базе компьютеризированных систем. Показана возможность решения проблемы достоверного мониторинга ответственного оборудования, работающего в водородсодержащих средах.

The paper deals with the features of damage, induced by laminated-hydrogen cracking in the cases of petrochemical equipment, made of low-alloyed steels. Some results on practical cases of damage are presented, derived using computerized systems. A possibility is demonstrated of solving the problem of valid monitoring of the critical equipment, operating in hydrogen-containing media.

За последние десять лет в Украине наблюдается тенденция к увеличению случаев слоистого сероводородного и водородного растрескивания нефтехимического оборудования, изготовленного из низкоуглеродистых и низколегированных сталей. Значительное число такого рода повреждений приходится на оборудование, находящееся в эксплуатации более двадцати лет, т. е. отработавшее нормативный срок службы; отмечаются и случаи водородно-слоистого растрескивания на практически новых аппаратах. Последнее связано с тем, что на отечественных нефтеперерабатывающих заводах за последние годы участились случаи переработки нефти с повышенным содержанием сернистых соединений без их предварительной очистки, значительно возросли и прости обработки. В связи с этим в нефтеперерабатывающей отрасли довольно остро стоит вопрос обеспечения надежной эксплуатации и своевременной замены поврежденного оборудования, что требует внедрения надежных систем технического диагностирования с целью определения оптимальных безопасных сроков эксплуатации. Как уже отмечалось ранее [1], при техническом диагностировании аппаратов, имеющих такого рода повреждения, существующие отечественные нормативы не устанавливают порядок оценки их состояния и условий дальнейшей эксплуатации. Данная задача решалась в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины в рамках темы «Разработка методов определения влияния водородно-слоистых и других характерных эксплуатационных дефектов на прочность и работоспособность сварных конструкций в нефтехимической и энергетической областях промышленности». В рамках данной тематики, помимо фундаментальных исследований, направленных на создание расчетных методов оценки критических состояний конструкций, имеющих эксплуатационные повреждения типа «пузырей», совместно с диагностическим предприятием «ТЕСТ» (г. Киев) были выполнены практические обследования аппаратов в нефтеперерабатывающей промышленности, подтвержденных слоисто-сероводородному и водородному растрескиванию. Анализ их резуль-

татов позволил выделить наиболее характерные случаи таких повреждений, определить оптимальные методы неразрушающего контроля (НК) и в ряде случаев дать конкретные технологические рекомендации по продлению сроков службы аппаратов давления (теплообменники, колонны, сепараторы и др.). Некоторые типичные случаи таких повреждений, выявленные в процессе практических обследований как визуальным, так и инструментальными методами разрушающего и НК, предлагаются к рассмотрению в данной статье.

В результате многолетнего обследования оборудования, эксплуатировавшегося в достаточно широком технологическом диапазоне (по температуре, давлению, агрессивности среды, содержанию H_2 , H_2S и др.), накопилось достаточно большое количество случаев слоисто-водородных и сероводородных повреждений корпусов аппаратов, изготовленных из малоуглеродистых и низколегированных сталей. На рис. 1 приведена гистограмма процентного распределения повреждений корпусов аппаратов из различных сталей относительно общего количества исследованных случаев. Разумеется, существует определенная условность в приведенных количественных оценках, поскольку при их расчете не учитывались индивидуальные особенности изготовления и условия работы каждого отдельного аппарата. Однако, учитывая большое количество статистических данных, полученных в течение десяти лет на разных производствах, по

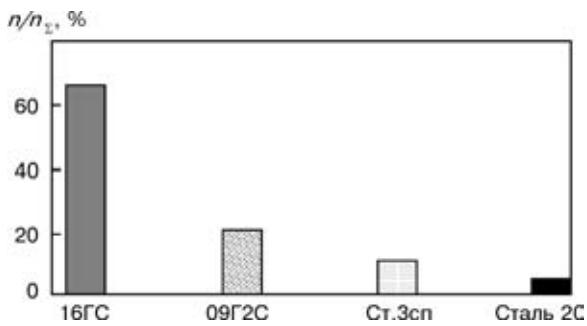


Рис. 1. Отношение количества обнаруженных n к общему количеству n_{Σ} случаев слоисто-водородных повреждений корпусов аппаратов, изготовленных из низколегированных и низкоуглеродистых сталей, в диапазоне толщин 12...48 мм

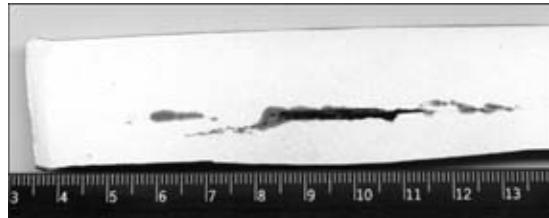


Рис. 2. Пластическое деформирования стенки под действием внутреннего давления в полости

крайней мере, качественно эта зависимость хорошо отражает реальное положение дел. Так, наиболее подвержены слоисто-водородному и сероводородному растрескиванию по результатам практических исследований металлоконструкции, изготовленные из сталей 16ГС и 09Г2С, в отличие от аппаратов, изготовленных из сталей 20, 20К и Ст.Зсп. Различие в степени повреждаемости в основном связано с особенностями структурной текстуры металлопроката [2] и диффузионными процессами, протекающими по границам залегания неметаллических включений [3, 4].

В данном случае существенное значение имеют степень обжатия листа и температура конца прокатки, а также наличие нормализации и распределение примесей (неметаллических включений) по его толщине. Возникающая структурная текстура и соответствующая анизотропия характеристик трещиностойкости и пластичности предопределяют направление и характер развития разрушения.

Для металлопроката с резко выраженной зональной сегрегацией (как правило, залегающей на глубинах, равных половине или трети толщины листа) слоистые растрескивания развиваются в зоне, характеризующейся значительной анизотропией прочностных свойств в направлении толщины.

Для таких сталей данный тип повреждений может отличаться по своей скорости развития в плоскости листа, носить ступенчатый (при относительно большой толщине слоя зональной сегрегации) или плоскостной характер. В дальнейшем по мере накопления повреждений может наблюдаться деформирование более тонкой стенки под действием внутреннего давления, возникающего за счет накопления в полостях молицированного газа, и разгерметизация наиболее нагруженных участков (рис. 2.). Для металлопроката с повышенным содержанием серы и более равномерным распределением сульфидных включений по толщине листа слоистые растрескивания в большинстве своем носят ступенчатый характер.

Разнообразие и характер слоистых растрескиваний приводят к значительным трудностям при диагностировании технического состояния оборудования, подверженного такого рода повреждениям. В первую очередь это связано как со сложностью определения скорости развития данного процесса в плоскости листа и в направлении его толщины, так и с умением отличить слоистое растрескивание от скоплений обычных неметаллических включений. Во вторую — со сложностью оценки напряженно-деформированного состояния поврежденных зон с учетом изменяющегося давления в полостях.

Рассмотрим наиболее типичные случаи повреждений водородным и сероводородным слоистым растрескиванием аппаратов, изготовленных из низколегированных сталей 16ГС, 09Г2С и малоуглеродистой стали Ст.Зсп.5. С целью выявления характерных отличий в слоистых повреждениях указанных марок сталей были отобраны газовые абсорбера, изготовленные из данных материалов и

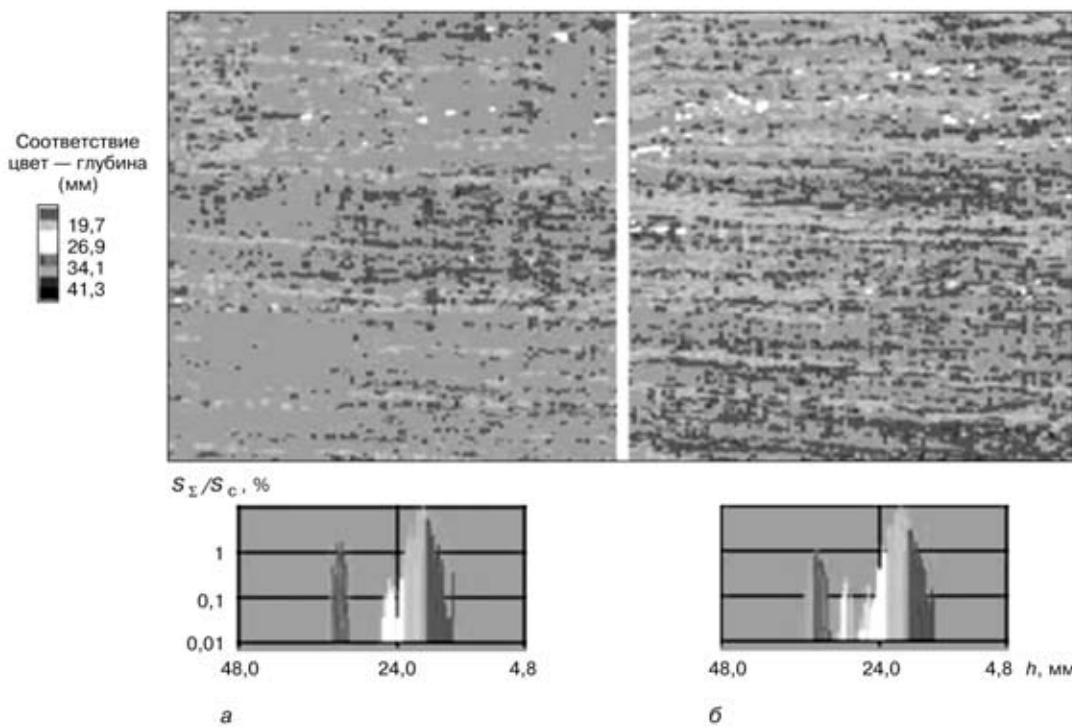


Рис. 3. Сравнение несплошностей в металле корпуса нефтеперерабатывающего аппарата: *а* — первое сканирование рабочего участка размерами 750×750 мм; *б* — его вторичное сканирование; внизу приведено распределение по толщине *h* отношения суммарной площади несплошностей S_z к площади сканирования S_c

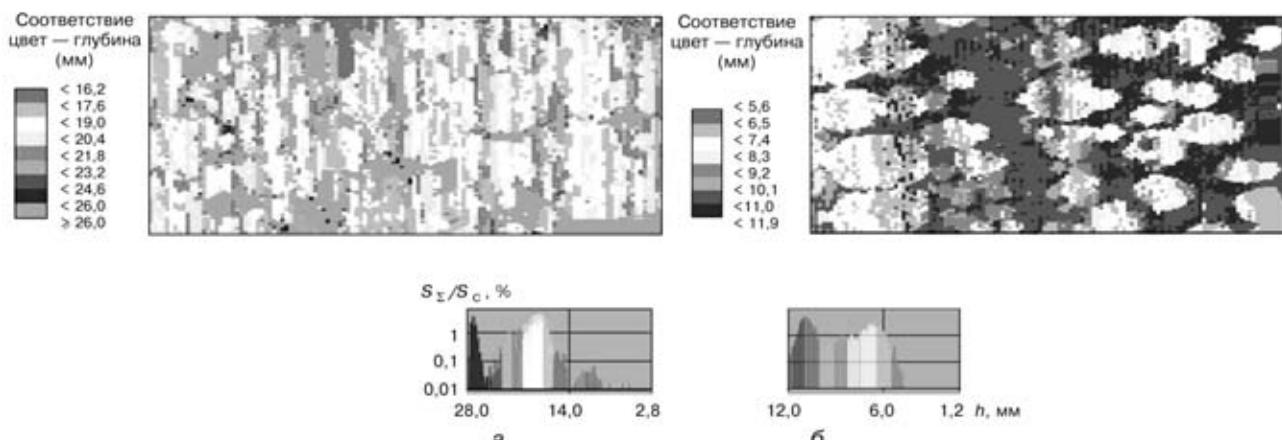


Рис. 4. Визуальное представление данных УЗ сканирования участка корпуса абсорбера, изготовленного из стали: а — 16ГС; б — Ст.Зсп5; размер участков 250×500 мм; толщина металла 28 мм

эксплуатируемые свыше двадцати лет в близких технологических режимах (температура эксплуатации равна 30...50 °C; среда — 15 % водный раствор МЭА; углеводородный газ, содержащий H₂ и H₂S в различных весовых объемах).

На рис. 3 представлены результаты ультразвукового (УЗ) сканирования участка корпуса абсорбера, изготовленного из стали 09Г2С толщиной 48 мм. Этот контрольный участок находился вдали от ввода агрессивной среды и был выбран как реперный с целью определения средней скорости развития слоисто-водородного растрескивания за год эксплуатации. Как видно из рис. 3, на данном этапе развития процесса слоисто-водородного растрескивания носит как плоскостной, так и ступенчатый характер с доминирующей скоростью развития в направлении плоскости проката. Ступенчатый характер растрескивания в этом случае определяется значительной шириной сегрегационной зоны.

Показанный на рис. 4, а участок сканирования корпуса абсорбера, изготовленного из стали 16ГС толщиной 28 мм, расположен напротив ввода водородсодержащего газа. На рисунке достаточно четко просматриваются два слоя, подверженных слоисто-водородному растрескиванию, залегающих на глубине соответственно 12...16 и 18,5...24,0 мм от наружной поверхности. Последний находится на завершающей стадии растрескивания, о чем свидетельствует характерное ступенчатое развитие процесса по границам развитых несплошностей и видимое пластическое деформирование тонкой стенки под действием критических давлений молизованного газа в полостях (в зависимости от глубины залегания и размеров несплошностей давление может значительно превышать 10 МПа). Слой на глубине 12...16 мм подвержен менее интенсивному растрескиванию, что объясняется его экранированием более нагруженным слоем на глубине 18,5...24,0 мм.

Участок сканирования корпуса абсорбера, изготовленного из стали марки Ст.Зсп5 толщиной 12 мм, несколько отличается характером слоистого растрескивания от рассмотренных выше. Как видно из рис. 4, б, размеры несплошностей в плоскости листа несколько меньше, чем на рис. 3, 4, а; ступенчатое развитие процесса слоистого растрески-

вания выходит на внутреннюю поверхность. В данном случае доминирующее развитие этого процесса происходит в направлении толщины листа. Подобный процесс растрескивания наблюдается также на изделиях из стали 20, что, как уже отмечалось выше, связано с особенностями структурной текстуры металлопроката и диффузионными процессами, идущими по границам залегания неметаллических включений. В целом развитие слоисто-водородных несплошностей зависит от достаточно большого количества факторов и их сочетаний во время эксплуатации. Естественно, что и скорость развития данных процессов может существенно изменяться в зависимости от области воздействия и влияния среды на рабочие части оборудования.

Во время диагностических обследований оборудования нефтехимической промышленности наибольшее внимание, естественно, уделялось зонам, подверженным наиболее интенсивному слоисто-водородному растрескиванию с целью определения максимальных скоростей и характера развития данного вида повреждений. В результате удалось выявить наиболее типичные зоны максимального развития слоистых водородных несплошностей для нефтеперерабатывающего оборудования. К ним в первую очередь следует отнести: область ввода водородсодержащих продуктов; места по линиям раздела сред; застойные зоны; области пласти-

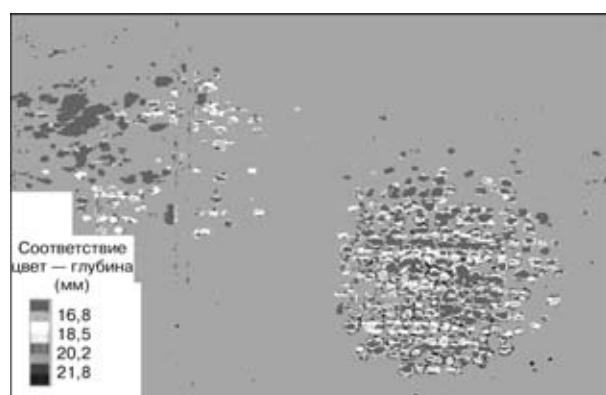


Рис. 5. Визуальное представление данных УЗ сканирования участка корпуса колонны, противоположного вводу продукта (водный раствор МЭА); размер участка 1600×2000 мм; толщина металла 22 мм

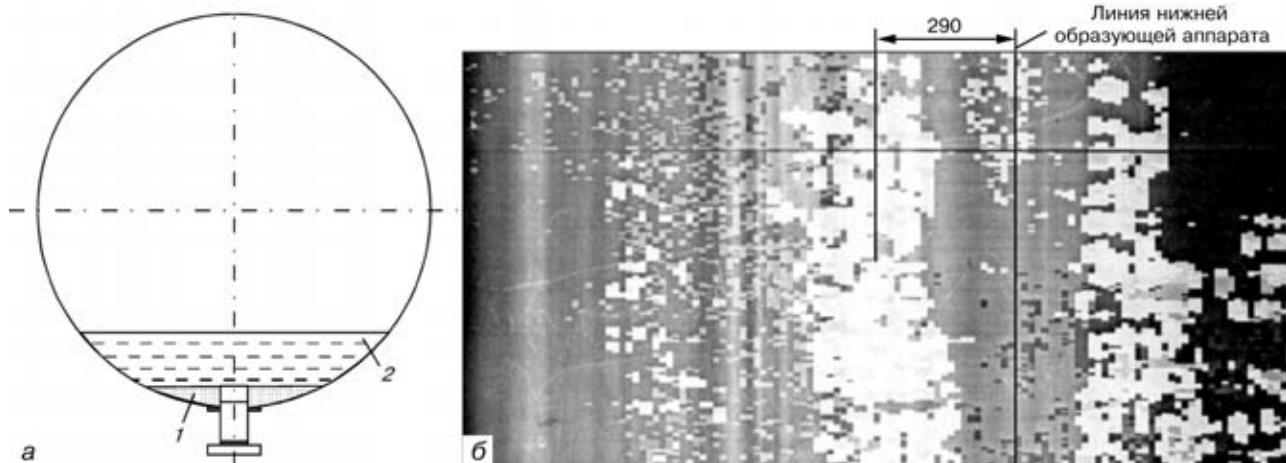


Рис. 6. Образование (а) застойной зоны 1 (2 – раздел фаз) и ее участок размером 1750×500 мм (б) с водородным расслоением металла (визуальное представление данных УЗ сканирования)

ких деформаций и зоны остаточных напряжений. В области ввода водородсодержащих продуктов, кроме относительно высокого содержания водорода, всегда наблюдается (в той или иной мере) воздействие потока (струи), которое способствует диффузионному насыщению металла в районе контакта и, как следствие, приводит к большим скоростям развития слоистого растрескивания, чем у других частей аппарата, удаленных от области ввода продукта. В качестве примера, иллюстрирующего сказанное выше, на рис. 5 приведена визуализация данных УЗ сканирования несплошностей на участке корпуса колонны, который располагался напротив ввода водного раствора МЭА в аппарат. В отличие от других участков колонны, которые также имели слоистые повреждения в металле, приведенная на рисунке область значительно отличается интенсивностью развития водородного растрескивания.

Достаточно частым случаем является водородное расслоение металла по линии раздела фазовых состояний сред. Как правило, такие места находятся в нижних частях аппарата. Например, для цилиндрических горизонтальных сепараторов наиболее интенсивные расслоения сосредоточены вдоль образующей корпуса аппарата на уровне колебания раздела сред (рис. 6, а).

В последние годы большинство оборудования зачастую эксплуатируется со значительными перерывами. Во время простоя из-за конструктивных особенностей возникают застойные зоны (рис. 6, а), что также в ряде случаев способствует более быстрому росту водородных расслоений. Так, на рис. 6, б показано слоисто-водородное растрескивание корпуса сепаратора в застойной области, образованной из-за выступающего патрубка. К характерным участкам, склонным к возможному интенсивному слоистому растрескиванию в водородсодержащих средах, относятся также области с остаточными напряжениями (например, зоны максимальных пластических деформаций при штамповке эллиптических днищ, места приварок вспомогательных элементов к корпусу и др.).

Из этого вытекают простые профилактические рекомендации по возможному замедлению процес-

сов слоисто-водородного растрескивания металла нефтехимического оборудования без изменения технологических режимов эксплуатации:

1) в местах возможных застойных зон усиление отверстий необходимо выполнять без выступающей части патрубка;

2) в районах подачи водородсодержащих сред в аппарат следует установить защитные экраны с целью предотвращения попадания прямой струи на стенку.

Дальнейшая эксплуатация нефтехимического оборудования, подверженного слоистому растрескиванию в водородсодержащих средах, естественно, требует его периодического контроля с целью выявления степени повреждения металла и динамики роста данного процесса. В этом случае определение технического состояния и оценка остаточного безопасного ресурса эксплуатации невозможны без условия адекватного описания несплошностей: реального размера, расположения (координат залегания), скорости их роста и т. д. Это общие требования, предъявляемые при проведении прочностного анализа объекта с несплошностями в металле. Из существующих видов НК для обнаружения и оценки внутренних несплошностей пригодны только два: акустический и радиационный. Поскольку радиационный принципиально не пригоден для работы с расслоениями, то фактически остается только один — акустический. Понимая эксплуатационные преимущества метода акустической эмиссии для оценки состояния оборудования с водородным растрескиванием, все-таки следует отметить, что в данном случае его возможности очень ограничены для количественных оценок и прогнозирования. Кроме того, применение этого метода сопряжено с существующими методическими трудностями. Поэтому если и возможно использование метода акустической эмиссии, то только для организаций с многолетней практикой подобных работ.

Возникает вопрос о возможности использования известной и весьма широко применяемой технологии ручного ультразвукового контроля (УЗК) для оценки слоисто-водородных несплошностей. Техника ручного контроля позволяет достаточно



легко выявлять слоистые несплошности. Однако их количественное описание на основе традиционной ручной технологии является весьма сложной задачей (если вообще возможной).

Это достаточно убедительно подтверждают приведенные в данной работе иллюстрации. Действительно, ведь речь идет не об отдельных несплошностях с четкими границами, а обычно о целых их совокупностях, лежащих на различных глубинах и перекрывающих друг друга. Еще сложнее оценить изменения размеров слоисто-водородных несплошностей во времени. Для этого необходимо проводить сравнительный анализ их геометрических характеристик, полученных во время периодических обследований. Провести такой анализ при помощи обычного ручного УЗ дефектоскопа практически нельзя из-за невозможности позиционирования положения преобразователя, а следовательно, и накопления и сохранения информации. Поэтому традиционная УЗ технология для определения размеров и оценки скорости роста слоисто-водородных несплошностей является малопригодной и неэффективной, поскольку основана на субъективных оценках оператора. При этом свести субъективную составляющую к довольно малому значению путем усложнения и регламентации процедур не удается в отличие от технологии контроля сварных соединений (даже в этом случае всем, кто проводил практический УЗК сварных соединений, известны сложности с формализацией геометрически сложных несплошностей). Поэтому в лучшем случае можно говорить о применении ручной технологии УЗК для качественных оценок типа больше-меньше и предварительного экспресс-анализа.

Как показали результаты практических обследований, наиболее полную документированную картину степени и характера поврежденности слоистыми растрескиваниями нефтеперерабатывающего оборудования дают компьютеризированные системы УЗК, позволяющие сохранять результаты сканирования поврежденных участков. Это в дальнейшем дает возможность по результатам повторного контроля реперных участков оценить скорость развития растрескивания и определить, на какой стадии находится данный процесс. Последнее базируется на многочисленных результатах обследований оборудования, полученных при использовании УЗ автоматизированной системы, а также расчетных моделях достижения критических состояний в зависимости от характера слоистого растрескивания в водородсодержащих средах. Это позволяет в зависимости от глубины залегания, характера повреждений и разработанных расчетных моделей установить максимально допускаемые размеры дефектов (площадь и глубину растрескивания, диаметр пластических вспучиваний металла и т. д.), до достижения которых возможна дальнейшая эксплуатация оборудования без проведения капитального ремонта поврежденных мест.

Такой подход к оценке технического состояния оборудования, подверженного слоисто-водородным повреждениям на начальных стадиях развития, позволяет установить периодический контроль за его состоянием непосредственно на местах служ-

бами технического надзора заводов без дополнительного привлечения специалистов.

Применение современных автоматизированных систем контроля позволяет разработать технологию диагностирования объектов с водородными расслоениями и оценить количественно дальнейший гарантированный безопасный срок возможной эксплуатации нефтехимического оборудования. В основе такого подхода лежат новые возможности мониторинга оборудования ответственного назначения, которые реализуются современными УЗ системами НК:

1. Объективность данных. Данные УЗК собираются при помощи механических сканеров с высокой точностью и заданной плотностью. При этом субъективная оценка оператора отсутствует, а процесс сбора информации достаточно легко формализуется.

2. Сохранение параметров контроля и данных сканирования. Все параметры контроля и данные сканирования доступны для последующего анализа и сохранения в электронном виде на современных носителях. Это позволяет создавать долгосрочные архивы, на базе которых можно проводить сравнительный анализ изменения несплошностей. Попытки его проведения существуют и в обычной практике ручного УЗК, но, как уже упоминалось, из-за субъективности информации и ее ограниченного объема, доступного для сохранения, такой анализ не очень эффективен. Известно, что подобная практика не находит широкого применения и не отражена в нормативных документах.

3. Высокая информативность. Количество информации не сопоставимо с тем, которое доступно при ручном контроле. Здесь следует привести такой пример. Инструкции ручного УЗК предусматривают анализ сигналов, амплитуда которых выше некоторого установленного уровня. Сигналы с меньшей амплитудой не рассматриваются, что снижает достоверность контроля. В отличие от этого автоматизированные системы контроля позволяют получить доступ к УЗ сигналам любой амплитуды, начиная с уровня шумов, что весьма актуально для эксплуатационного контроля, где приходится отслеживать развитие несплошностей и оценивать динамику их развития.

4. Применение относительно сложных схем контроля. Появляется возможность использовать специальные схемные решения, которые могут включать несколько преобразователей, что дает возможность повысить достоверность обнаружения и идентификации несплошностей.

5. Математическая обработка данных. Это становится актуальным в связи с высокой информативностью и специальными схемными решениями. По существу речь идет о пространственно-временном анализе или фильтрации информации. Преимущества таких решений хорошо известны, в том числе и в области НК (ALOK, SAFT). В связи с постоянно растущей доступностью и эффективностью программно-аппаратных средств математические методы интенсивно развиваются и внедряются в практику НК.



6. *Экспертный анализ информации.* Применение современных систем контроля позволяет более рационально использовать квалификацию персонала и одновременно повысить качество работ до экспертного уровня. Условно работа разбивается на два этапа — сбора и обработки информации. Первый легко поддается формализации и может осуществляться персоналом с довольно низкой квалификацией. Однако процесс сбора информации всегда сопровождается высокой трудоемкостью и большими потерями времени. С другой стороны, всегда существует дефицит в квалифицированном персонале, который в данном случае можно сосредоточить на более ответственных и сложных этапах работы — анализе накопленной информации и ее интерпретации в форме, пригодной для проведения количественного прочностного расчета. При этом в ряде случаев, когда достоверная расшифровка невозможна, могут потребоваться повторные сканирования по специальным (не штатным) схемным решениям. Собственно, это и является задачей экспертного контроля. Поскольку весь анализ и оценка данных сканирования осуществляется специалистами высокой квалификации, то появляется возможность реально контролировать и выполнять всю работу на экспертном уровне.

7. *Сравнительный анализ.* Поскольку процесс сканирования можно повторять с высокой точностью, то становится возможным проводить сравнение данных, полученных на одном и том же участке, но в разное время (см. рис. 2). В результате сравнения можно установить не только факт роста несплошностей, но также и скорость их роста, что чрезвычайно важно при расчетной оценке возможного дальнейшего безопасного срока службы оборудования.

Таким образом, техническое диагностирование оборудования, подверженного слоисто-водородному растрескиванию, и определение безопасных сроков его дальнейшей эксплуатации невозможны без решения следующих основных задач. Первая задача заключается в создании надежных и относительно недорогих систем УЗК, а также совершенствования методик НК, позволяющих определять геометрические характеристики, скорость и характер развития слоистого растрескивания. Ко второй относится использование современных прочностных подходов к оптимальной оценке размеров возмож-

ного безопасного развития несплошностей в зависимости от глубины их залегания и изменяющегося давления в полостях.

ВЫВОДЫ

1. Техническое диагностирование и мониторинг объектов с водородным растрескиванием металла целесообразно осуществлять на базе современных компьютеризированных УЗК. Это дает возможность проводить количественный прочностной анализ нефтехимического оборудования со слоисто-водородным растрескиванием, что со своей стороны позволяет более рационально подойти к мониторингу, оценке технического состояния, определению сроков дальнейшей эксплуатации, а главное — своевременно предупредить аварийное состояние оборудования.

2. Проведение профилактических мероприятий, направленных на уменьшение скорости водородного растрескивания в местах возможных застойных зон и ввода агрессивных водородсодержащих и сероводородных сред (удаление выступающих частей патрубков и экранирование потока), позволяет значительно продлить сроки службы оборудования без изменения его технологических режимов эксплуатации.

3. При капитальном ремонте и изготовлении нового оборудования из низколегированных и малоуглеродистых сталей, эксплуатируемого в водородсодержащих средах, в числе основных требований к выбору материала должны быть его однородность с изотропностью служебных характеристик и пониженное содержание неметаллических включений.

1. *Некоторые результаты технической диагностики сосудов и трубопроводов в нефтехимической промышленности* / В. С. Гиренко, М. Д. Рабкина, В. П. Дядин и др. // Технич. диагностика и неразруш. контроль. — 1998. — № 3. — С. 17–24.
2. *Слоистое, слоисто-хрупкое и слоисто-вязкое разрушение сварных соединений* // В. С. Гиренко, А. В. Бернацкий, М. Д. Рабкина, Н. П. Коржова / Проблемы прочности. — 1987. — № 3. — С. 70–76.
3. *Карпенко Г. В. Нові уявлення про вплив водню на властивості сталі* // Прикладна механіка. — 1960. — № 4. — С. 361–367.
4. *Карпенко Г. В., Кропякевич Р. И. Влияние водорода на свойства стали*. — М.: Изд-во лит. по чер. и цв. металлургии, 1962. — 196 с.

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

Поступила в редакцию
05.11.2001



О ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МАГНИТНОЙ СТРУКТУРОСКОПИИ ДЕТАЛЕЙ

И. Г. СОКОЛИНСКАЯ

Показаны преимущества использования метода магнитной структуроскопии для неразрушающего входного контроля качества ответственных и нагруженных деталей различных машин и механизмов, в том числе горношахтного оборудования. Установлено, что данным методом с вероятностью не менее 0,85 можно обнаруживать дефекты в деталях до сборки механизмов или их ввода в эксплуатацию и таким образом прогнозировать и повышать надежность используемого оборудования.

The paper demonstrates the advantages of applying the method of magnetic structural defectoscopy for NDT incoming inspection of the quality of critical and loaded parts of various machines and mechanisms, including mining equipment. It is found that this method allows, with not less, than 0.85 probability, detection of defects in parts prior to assembly of mechanisms or their putting into operation and, thus, forecasting and improving the reliability of the used equipment.

Надежность машин и механизмов определяется как функция вероятностей безотказной работы их составных частей в течение требуемых промежутка времени или наработки до отказа. В статье [1] справедливо указывается на необходимость исследования причин разрушений элементов машин и механизмов для снижения факторов случайности отказов и определения познания путей их предотвращения. Одним из наиболее эффективных способов повышения надежности является обеспечение качества материалов, из которых изготавливаются детали, и их термическая обработка, обеспечивающая соответствие структурно-механических свойств характеру и уровню нагрузок, действию которых детали подвергаются во время эксплуатации. Поэтому для обеспечения высокой надежности механизмов необходим полный и достоверный контроль качества изготовления деталей, в частности, их структурно-механических свойств. Этому могло бы способствовать широкое применение на заводах массового НК деталей, не допускающего попадание на сборку негодных по значимым параметрам. К сожалению, в машиностроении такой контроль не достиг должного уровня — это заметно влияет на надежность и конкурентоспособность его продукции.

В угольной промышленности проблема надежности горношахтного оборудования стоит особенно остро, так как разрушение его элементов может быть связано с безопасностью или, по крайней мере, с большой трудоемкостью восстановления работоспособности отказавшего механизма и связанными с этим значительными потерями добычи. Поэтому на передовых шахтах Украины нашел распространение входной НК качества деталей забойного оборудования и проходческой техники. Он проводится перед спуском в шахту комбайнов, конвейеров, секций механизированной крепи. Такому контролю подвергаются наиболее нагруженные и ответственные детали: зубчатые колеса, шестерни, валы, ведущие звезды, элементы цепей, штоки стоек крепей и домкратов и т. д. При этом применяется, в частности, метод магнитной струк-

туроскопии с помощью портативного структуроскопа СИЛА, который разработан и изготавливается Специализированным центром «Углеизотоп» и внесен в Госреестр Украины.

Действие прибора основано на локальном намагничивании до состояния, близкого к насыщению, участка на поверхности контролируемой детали с помощью мощного импульса тока (подается в соленоид в торце преобразователя). После затухания импульса производится измерении остаточной намагниченности этого участка феррозондовым преобразователем-градиентометром. Последний сконструирован таким образом, что с его помощью можно контролировать детали непосредственно в сборочных единицах, поскольку он защищен от влияния внешних магнитных полей [2, 3]. Размеры и форма преобразователя позволяют контролировать детали не только с плоской, но и с цилиндрической и эвольвентной поверхностью, в том числе на внутренней поверхности цилиндров и рабочей поверхности зубьев шестерен с модулем не менее 5 и т. д. Основное влияние на показания прибора оказывает поверхностный слой глубиной порядка 1 мм (в зависимости от электрических и магнитных свойств). Это позволяет контролировать качество цементированного слоя [4, 5], а цементация, как известно, наиболее часто применяется для поверхностного упрочнения деталей. Прибор изготавливается в разных модификациях по способу питания: автономное от батареи аккумуляторов напряжением 16 В, от сети 220 В и комбинированное, позволяющее работать по любому из названных вариантов. Масса прибора равна 2,0...2,5 кг.

Проведенные исследования образцов и деталей из разных сталей, термообработанных по различным режимам, позволили нам установить корреляционные связи между показаниями прибора, с одной стороны, и химическим составом, структурой и механическими свойствами, с другой, для большего спектра сталей и деталей. На этом основании разработаны методики, устанавливающие критические границы годности с учетом необходимых эксплуатационных свойств деталей и позволяющие с высокой степенью достоверности (порядка 80...90 %) разделить



контролируемые детали на удовлетворительные и неудовлетворительные.

Магнитная структуроскопия разных деталей горношахтного оборудования с помощью приборов СИЛА и их более ранних предшественников проводится нами уже более 25 лет и отличается высокой эффективностью контроля. В те годы, когда он проводился регулярно, процент бракованных деталей уменьшился, благодаря обратной связи с заводами, с 40 до 15. А когда в начале 1990-х гг. контроль практически прекратился и стал возобновляться во второй половине 1990-х, количество бракованных деталей было на уровне 55...60 %.

Кроме входного контроля, нами проводятся исследования деталей, вышедших из строя в период гарантийной эксплуатации, для установления причин отказов. Изучались отказы вследствие износа, смятия или хрупкого разрушения шестерен и валов, усталостного разрушения деталей редукторов, хрупкого, пластичного или усталостного разрушения звеньев цепей, разрушения и деформации штоков стоек крепей и демкратов, их коррозионного повреждения и т. д. Благодаря такому сочетанию работ нами накоплен большой информационный массив данных о связи магнитных свойств с работоспособностью и долговечностью различных деталей, дающих возможность с большой степенью достоверности прогнозировать их ресурс. Наиболее полный материал накоплен по шестерням, валам и звеньям цепей, поскольку эти детали чаще других приводят к отказам оборудования. В угольном машиностроении широко применяются шестерни, вал-шестерни, колеса и валы из сталей 20Х2Н4А, 12ХН3А, 18-30ХГТ, цементированные на глубину 0,8...1,6 мм, закаленные и низкоотпущеные. Виды отказов этих деталей можно разделить на три основные группы:

1) постепенный износ или смятие, если деталь плохо закалена или глубина упрочненного слоя менее 0,5 мм, или (что реже) в структуре цементированного слоя избыточное содержание аустенита;

2) постепенное питтинговое разрушение контактной поверхности зубьев шестерен или шлицев из-

за избыточного содержания в цементированном слое карбидов;

3) внезапное хрупкое разрушение из-за некачественно проведенного низкотемпературного отпуска.

Опыт показывает, что, используя метод неразрушающей магнитной структуроскопии, детали с названными и другими менее характерными дефектами с вероятностью не менее 0,85 можно обнаружить до сборки механизма или ввода его в эксплуатацию. Особенно важно то, что этим методом выявляются дефекты, которые другими методами, например наиболее распространенной твердометрией, выявить практически невозможно. У цементированных деталей ими являются малая глубина слоя, повышенное содержание карбидов и, главное, качество низкотемпературного отпуска. Так, если в области температур 150...200 °C твердость стали 20Х2Н4А изменяется на 2...3 %, то коэрцитивная сила — на 18...23 % [6]. Между тем такое изменение температуры отпуска, существенно влияя на уровень структурных напряжений, значительно сказывается на износстойкости (износ образцов изменяется от 9,0 до 4,5 г) и особенно на снижении предела усталости и склонности к хрупкому разрушению. Например, вал угольного комбайна, который по результатам магнитной структуроскопии оценили как «хрупкий», был тем не менеепущен в эксплуатацию и через 10 дней разрушился. На шестерне с высокими показаниями структуроскопа через 16 дней произошло хрупкое разрушение зубьев. Твердость обеих разрушенных деталей была в норме, «диагноз» — недоотпуск.

На рис. 1, а показана связь показаний магнитного структуроскопа с наработкой на отказ цементированных шестерен, вал-шестерен и валов, в том числе шлицевых, не отработавших гарантийный срок 12 мес. и попавших к нам на исследование. Очевидна высокая достоверность неразрушающего метода априорной оценки надежности деталей. Четко определяется снижение наработки тех деталей, на которых получены показания структуроскопа выше или ниже установленных контролльных границ удовлетворительного качества. Из 55 деталей

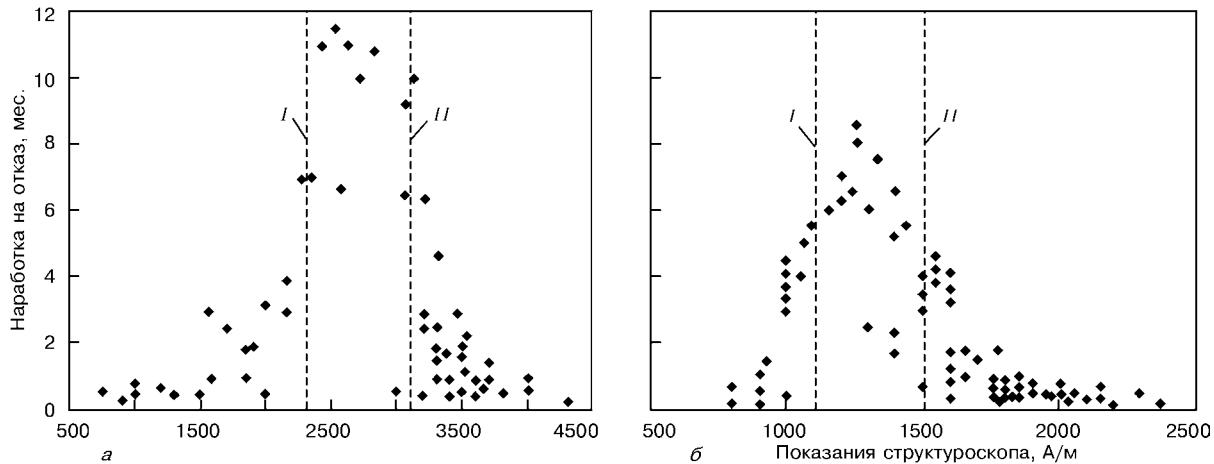


Рис. 1. Связь показаний магнитного структуроскопа с наработкой на отказ: а — цементированных шестерен и валов угольных комбайнов и контейнеров; б — соединительных звеньев конвейерной цепи; I, II — нижняя и верхняя границы удовлетворительного качества



четыре, оцененные как годные, отработали 6–9 мес., а одна — менее 1 мес. При формальном подходе к оценке результатов эти случаи принимаются за погрешность. Что касается деталей, отработавших 10...11 мес., то их неверно было бы считать негодными, так как их наработка близка к гарантийной. Грубой ошибкой при данном методе следовало бы считать деталь, которая принята как годная, но разрушилась в первые дни эксплуатации. Проведенное исследование не обнаружило отклонений ни в структуре, ни в режиме термообработки — причиной разрушения детали было, по-видимому, или нарушение режима эксплуатации, или некачественная сборка.

Следует, кроме того, учесть, что исследованные детали были изготовлены из разных сталей и эксплуатировались в разных условиях. Тем не менее приведенный график наглядно демонстрирует эффективность неразрушающего метода оценки надежности цементированных деталей: его ошибка составляет менее 10 %. При этом необходимо учесть, что здесь не рассматриваются детали, которые были правильно оценены как годные и не попали к нам на исследование, поскольку отработали гарантийный срок.

К числу наиболее ненадежных элементов горношахтного оборудования относятся соединительные звенья цепей скребковых конвейеров. Они изготавливаются из стали 35ХГСА, подвергаются закалке и отпуску при температуре 450 ± 20 °С. Звенья работают в условиях разного рода динамических нагрузок со значительными колебаниями их значений. Поэтому их основной эксплуатационной характеристикой является циклическая долговечность. Она должна контролироваться испытаниями на растяжение пульсирующей нагрузкой хотя бы на малой выборке из технологических партий. Однако на заводах-изготовителях для оценки качества термообработки звеньев применяются в лучшем случае испытания на статическое растяжение, причем, естественно, на чрезвычайно малопредставительной выборке. Такой контроль не только не может обеспечить требуемую надежность цепей, но даже вреден: получение высокой статической прочности приводит к ошибочным выводам о надежности звеньев, поскольку выявленная прочность может явиться результатом снижения температуры отпуска, что обязательно приводит к снижению циклической долговечности. Это утверждение, кроме того, что использован большой объем экспериментального материала, основано на следующих соображениях. Для стали 35ХГСА, которая приобретает отпускную хрупкость в области температур отпуска 300...400 °С, особенно важно не попасть в эту зону, так как с понижением вязкости металла возрастает роль концентраторов напряжений и скоплений дислокаций, а следовательно, повышается скорость развития трещин технологического или эксплуатационного происхождения. Кроме того, со снижением температуры отпуска уменьшается соотношение между пределом прочности и пределом текучести металла, и звенья попадают в область циклического разупрочнения [7],

что также приводит к ускоренному усталостному разрушению. Так как в области температур отпуска до 500 °С наблюдается довольно хорошая корреляционная связь коэрцитивной силы с температурой отпуска и структурно-механическими характеристиками стали 35ХГСА, то для контроля качества этих свойств применили метод коэрцитиметрии. При этом фактически измеряли остаточную намагниченность звена или магнитного « пятна» на нем, а эти характеристики вследствие большого размагничивающего фактора пропорциональны коэрцитивной силе.

Для заводов-изготовителей звеньев были созданы стационарные установки для массовой автоматической разбраковки звеньев по коэрцитивной силе [8, 9]. На них с достоверностью 85 % звенья разделяют на 3 группы:

удовлетворительные, т. е. обладающие статической разрывной нагрузкой и циклической долговечностью не ниже требуемых чертежом и ТУ;

неудовлетворительные с коэрцитивной силой меньше нижней контрольной границы, обладающие низкой статической прочностью (как правило, плохо закаленные);

неудовлетворительные с коэрцитивной силой выше верхней контрольной границы, обладающие низкой циклической долговечностью и наиболее часто разрушающиеся в самом начале эксплуатации. При этом, что важно, выбраковываются звенья, которые подвергались отпуску при пониженной, а также при требуемой температуре, но меньшее время (один час вместо двух), — их твердость и статическая прочность в норме, а циклическая долговечность снижена на 15...30 %.

Применение такого контроля на заводе снижает аварийность выпускаемых им конвейеров на 25...30 %. Но в связи с тем, что заводы это делают далеко не всегда, на ряде шахт применяется ручной НК звеньев цепи в сборе до ее спуска в шахту. Это позволяет выбраковывать и изымать из цепи не менее 90 % таких звеньев, которые могли разрушиться уже с первых дней эксплуатации. Для такого контроля нами также разработана методика, устанавливающая контрольные границы отбраковки звеньев.

На рис. 1, б показана связь показаний магнитного структуроскопа с наработкой на отказ звеньев, которая также иллюстрирует высокую достоверность прогнозирования долговечности звеньев по результатам НК. Из 77 приведенных на нем результатов 3 звена, попавшие в зону удовлетворительного качества, проработали меньше 4 мес., поэтому можно оценивать погрешность контроля (риск потребителя) как близкую к 4 %. Все забракованные звенья проработали не более 5,5 мес., причем наработка была тем ниже, чем больше показания прибора отличаются от контрольных границ. Следует также учитывать, что вероятно разрушение и годных звеньев из-за перегрузки конвейера, «заедания» цепи на стыках направляющих, некачественной сборки цепи и т. д. Поэтому эффективность НК становится еще более очевидной.

В последнее время участились случаи отказов подшипников: разрушение обойм, износ или де-



формация их или роликов, задиры на контактных поверхностях. Хотя нами пока не накоплен необходимый для окончательных выводов информационный массив, но уже можно видеть, что методом магнитной структуроскопии можно обнаруживать негодные подшипники. Хрупкому разрушению подвергаются обоймы, показания структуроскопа на которых высокие, хотя твердость и остается в норме. Эти обоймы, видимо, подверглись некачественному отпуску: для стали ШХ15 снижение температуры отпуска с 200 до 100 °C приводит к незначительному, практически не определяемому повышению твердости и к существенному, порядка 15 % повышению коэрцитивной силы [10]. В нашей практике были также случаи, когда низкие показания структуроскопа при контроле роликов соответствовали их ускоренному износу или низкие показания структуроскопа, полученные для обойм, сочетались с их износом и деформацией смятия роликами на дорожке качения. Это позволяет говорить о хороших перспективах применения НК подшипников на машиностроительных заводах перед их установкой в ответственных узлах машин, поскольку уровень контроля на подшипниковых заводах в последнее время, видимо, значительно снизился, и это существенно влияет на надежность машин и механизмов. В некоторых случаях пренебрежение НК приводит даже к трагическим последствиям: использование магнитной структуроскопии могло бы выявить и не допустить к применению, например, маховик шахтного гировоза, не подвергшийся требуемой термообработке, в результате чего он разорвался на куски при раскрутке, смертельно травмировав машиниста.

Поскольку детали работают в механизме, оказывая взаимное влияние друг на друга, то по результатам контроля отдельных деталей можно прогнозировать работу механизма в целом, влиять на его надежность. Например, обнаруженная по низким показаниям структуроскопа некачественно термообработанная ведущая звезда привода цепи могла бы существенно снизить наработку последней цепи, так как износ ложа звена на звезде приводит к изменению значения и перераспределению нагрузки на звенья и вследствие этого — к их ускоренному разрушению.

Мы работаем в основном в угольной промышленности. Однако наш опыт применения магнитной структуроскопии деталей в других отраслях показал эффективность ее применения для прогнозирования и повышения надежности автомобилей, дизельных двигателей, любых редукторов и т. д. Например, внедренный в транспортном цехе одного из горнорудных карьеров неразрушающий отбор шестерен для редукторов мотор-колес карьерных самосвалов позволил существенно повысить их наработку на отказ. Магнитный НК качества термообработки клапанов для дизельных двигателей (сталь 40Х10С2М) позволяет прогнозировать их износостойкость с достоверностью до 90 %, в то

время как применяющийся на заводе метод контроля клапанов по твердости и неточен, и малопроизводителен, а значит, проводится на малых выборках. Следовательно, он не может гарантировать повышение долговечности клапанов.

Наш опыт показал, что даже на предприятиях с хорошо отлаженной технологией и высокой культурой производства количество негодных деталей, поступающих на сборку, всегда достигает нескольких процентов, если не применяются методы массового НК. При этом необходимо учитывать, что такой контроль эффективен только тогда, когда он основан на тщательно и квалифицированно разработанной методике, учитывающей выявление всех факторов, влияющих на надежность объектов контроля.

Таким образом, одним из наиболее эффективных средств повышения надежности и конкурентоспособности продукции отечественного машиностроения является широкое применение высокодостоверного, высокопроизводительного, дешевого неразрушающего магнитоструктурного контроля наиболее ответственных и нагруженных деталей машин и механизмов.

1. Комаровский А. А. Физика отказов конструкционных материалов // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2001. — № 1. — 3–7.
2. А. с. 1260831 СССР, МКИ⁴ Г 01 N 27/90 // Способ неразрушающего контроля физико-механических характеристик изделий из ферромагнитных материалов / И. А. Афанасенко, Л. И. Лумировская, И. Г. Соколинская, Л. П. Яйленко. — Опубл. 30.09.86; Бюл. № 36.
3. А. с. 1385053 СССР, МКИ⁴ Г 01 N 27/80 // Способ неразрушающего контроля физико-механических характеристик изделий из ферромагнитных материалов и устройство для его осуществления / И. А. Афанасенко, Л. И. Лумировская, И. Г. Соколинская, Л. П. Яйленко. — Опубл. 30.03.88; Бюл. № 12.
4. Соколинская И. Г., Лумировская Л. И. О неразрушающем контроле твердости и микроструктуры цементированного слоя шестерен из стали 20Х2Н4А // Дефектоскопия. — 1982. — № 2.
5. Лумировская Л. И., Соколинская И. Г. Неразрушающий контроль структурно-механических свойств поверхностно-упрочненных слоев // Сб. докл. XII Всесоюз. конф. «Неразрушающие физические методы и средства контроля».
6. Соколинская И. Г., Лумировская Л. И. Применение магнитной структуроскопии для контроля материалов и изделий при технической экспертизе разрушений деталей // Матер. науч.-техн. конф. «ЛЕОТЕСТ-98», Киев-Львов, 1998.
7. Циклические деформации и усталость металлов // В. Т. Троценко, Л. А. Хамаза, В. В. Покровский и др. — Киев: Наук. думка, 1985. — Т. 2.
8. Прибор для магнитного автоматического контроля соединительных звеньев тяговых цепей шахтных скребковых конвейеров / И. А. Афанасенко, Г. Ф. Ванда, Л. И. Лумировская, И. Г. Соколинская // Сб. матер. Всесоюз. науч.-техн. конф. «Современные методы и средства контроля качества материалов и изделий без разрушения». — Минск, 1970.
9. Магнитный автоматизированный контроль качества термообработки звеньев цепей скребковых конвейеров с помощью установки УМКА. — Донецк, 1985. — (Информ. листок / ДонЦБНТИ).
10. Мельгуй М. А. Магнитный контроль механических свойств сталей. — Минск: Наука и техника, 1980.



ДИАГНОСТИКА УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН: ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НОВЫХ ПРИЗНАКОВ, ОСНОВАННЫХ НА ПРЕОБРАЗОВАНИИ ФУРЬЕ

Л. М. ГЕЛЬМАН, Ю. Ф. ЗИНЬКОВСКИЙ, И. В. ПЕТРУНИН

Исследован новый обобщенный подход к формированию диагностических признаков, предложенный ранее для случаев использования преобразования Фурье. Для обнаружения усталостной трещины в работе рассмотрен диагностический метод вынужденных колебаний с узкополосным гауссовским возбуждением. Проведено сравнение эффективностей диагностики усталостной трещины при использовании новых диагностических признаков и традиционной спектральной плотности мощности. Показано, что новые признаки обеспечивают более высокую эффективность диагностики, чем спектральная плотность мощности сигналов.

A new generalized approach to formation of diagnostic parameters has been studied. This approach was earlier proposed for the cases, when Fourier transform is used. For finding the fatigue crack the paper considers the diagnostic method of forced vibrations with narrow-band Gaussian excitation. The effectiveness of fatigue cracks has been compared when using new diagnostic parameters and traditional spectral power density. It is shown that the new parameters provide a higher effectiveness of diagnostics, than the spectral power density.

В статье исследован новый обобщенный подход [1, 2], предложенный для случаев использования преобразование Фурье. Он применим для задач мониторинга, диагностики, обработки сигналов и распознавания образов [3–6] и в отличие от традиционных методов, базирующихся на спектральной плотности мощности или фазе преобразования Фурье, заключается в одновременном использовании новых диагностических признаков: действительной и мнимой составляющих преобразования Фурье сигналов. Для обнаружения усталостной трещины в данной работе рассматривается диагностический метод вынужденных колебаний с узкополосным гауссовским возбуждением с изменяющейся центральной частотой, предложенный в [7].

Целью работы является сравнение эффективностей диагностики усталостной трещины при использовании новых признаков [1, 2] и традиционного диагностического признака — спектральной плотности. Основа рассматриваемого диагностического метода вынужденных колебаний заключается в том, что уровень нелинейности диагностируемого объекта с трещиной растет с увеличением размера трещины. Диагностируемый объект рассматривается как нелинейный осциллятор с одной степенью свободы [8, 9]:

$$\begin{aligned} \ddot{X} + 2\xi_s \omega_s \dot{X} + \omega_s^2 X &= A(t) \cos(\omega_f t + \phi), \quad x \geq 0, \\ \ddot{X} + 2\xi_c \omega_c \dot{X} + \omega_c^2 X &= A(t) \cos(\omega_f t + \phi), \quad x < 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где $X = x/m$, x — смещение; $\xi_s = \frac{c}{2\sqrt{k_s m}}$;

$\xi_c = \frac{c}{2\sqrt{k_c m}}$; $\omega_s = \sqrt{\frac{k_s}{m}}$; $\omega_c = \sqrt{\frac{k_c}{m}}$; m , c — соответственно масса и коэффициент демпфирования; k_s , k_c — соответственно жесткость при растяжении (трещина открыта) и сжатии (трещина закрыта); $A(t)$ — рэлеевская огибающая нестационарного узкополосного гауссовского процесса; ω_f , ϕ — соответственно изменяющаяся частота возбуждения

© Л. М. Гельман, Ю. Ф. Зиньковский, И. В. Петрунин, 2002

и случайная начальная фаза нестационарного узкополосного гауссовского шума [10]. При сжатии трещина закрыта, и материал ведет себя аналогично однородному, при этом жесткость такая же, как и у материала без трещины: $k_c = k$. При растяжении трещина открыта, и материал неоднороден; следовательно, происходит уменьшение жесткости на величину $\Delta k = k_c - k_s$. Случайная начальная фаза равномерно распределена в интервале $[0; 2\pi]$.

Собственная частота объекта с трещиной определяется следующим выражением [8, 9]:

$$\omega_0 = 2 \frac{\omega_s \omega_c}{\omega_s + \omega_c} = \omega_n \frac{\sqrt{1 - \Delta k/k}}{1 + \sqrt{1 - \Delta k/k}}, \quad (2)$$

где ω_n — собственная частота бездефектной детали, $\omega_n = \sqrt{k/m}$.

Следуя [1, 2], в качестве диагностических признаков используем одновременно действительную X_R и мнимую X_I составляющие кратковременного преобразования Фурье высшей гармоники вынужденных резонансных колебаний:

$$X_R = \int_0^{t_1} X(t) \cos(i\omega_0 t) dt, \quad X_I = \int_0^{t_1} X(t) \sin(i\omega_0 t) dt, \quad (3)$$

где t_1 — верхняя граница временного интервала, i — номер гармоники.

Аналогичным образом вводится диагностический признак на основе спектральной плотности мощности:

$$X_{PSD} = \left(\int_0^{t_1} X(t) \sin(i\omega_0 t) dt \right)^2 + \left(\int_0^{t_1} X(t) \cos(i\omega_0 t) dt \right)^2.$$

Рассмотрим двухклассовую диагностику относительного коэффициента жесткости $\Delta k/k = (\Delta k/k)_j$ для гипотез H_j , $j = 0, 1$. Оптимальными преобразованиями диагностических признаков согласно системе уравнений (3) и спектральной плотности мощности высшей гармоники резонансных

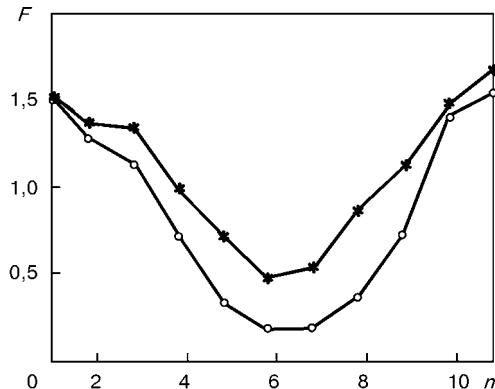


Рис. 1. Зависимости критерия Фишера F от номера эксперимента n для спектра мощности (\circ) и новых признаков ($*$)

колебаний являются следующие отношения правдоподобия:

$$L(X_R, X_I) = \frac{W(X_R, X_I | H_0)}{W(X_R, X_I | H_1)},$$

$$L(X_{PSD}) = \frac{W(X_{PSD} | H_0)}{W(X_{PSD} | H_1)},$$

где $W(X_R, X_I | H_j)$ — условная двумерная функция распределения вероятности диагностических признаков для гипотезы H_j ; $W(X_{PSD} | H_j)$ — условная одномерная функция распределения вероятностей спектральной плотности мощности для гипотезы H_j . Так как система уравнений (1) не решается аналитически, то для исследования обнаружения трещины было использовано численное моделирование. Используя эту систему уравнений, промоделировали резонансную реакцию объекта диагностики при наличии трещины, возбуждаемого нестационарным узкополосным случайнм гауссовским шумом, затем оценили отношения правдоподобия признаков согласно системе уравнений (3) и спектра мощности синтезированного сигнала.

Для сравнения эффективностей диагностики новых признаков и традиционного спектра мощности был использован критерий Фишера [11]

$$F = \frac{[m_1(u/H_0) - m_1(u/H_1)]^2}{\sigma^2(u/H_0) + \sigma^2(u/H_1)}, \quad (4)$$

где u/H_j — условная величина для гипотезы H_j , $j = 0, 1$; m_1 и σ^2 — символы математического ожидания и дисперсии.

Критерии Фишера для новых признаков F_{new} и спектральной плотности мощности F_{PSD} имеют вид:

$$F_{new} = \frac{[m_1(L|X_R, X_I, \cdot | H_0) - m_1(L|X_R, X_I, \cdot | H_1)]^2}{\sigma^2(L|X_R, X_I, \cdot | H_0) + \sigma^2(L|X_R, X_I, \cdot | H_1)}, \quad (5)$$

$$F_{PSD} = \frac{[m_1(L|X_{PSD} | H_0) - m_1(L|X_{PSD} | H_1)]^2}{\sigma^2(L|X_{PSD} | H_0) + \sigma^2(L|X_{PSD} | H_1)}. \quad (6)$$

Экспериментальные значения критериев Фишера для новых признаков и спектра мощности

Критерий Фишера	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
F_{new}	1,52	1,37	1,34	0,99	0,71	0,47	0,54	0,86	1,14	1,49	1,69
F_{PSD}	1,50	1,29	1,14	0,72	0,34	0,19	0,20	0,38	0,73	1,42	1,55

Собственная частота объекта диагностики при условии отсутствия трещины $f_n = 20$ Гц ($\omega_n = 40\pi$ рад/с). В представленной работе рассмотрены объекты с трещинами, характеризующиеся следующими значениями относительных жесткостей:

$$\left(\frac{\Delta k}{k} \right)_{H_0} = 0,1, \quad \left(\frac{\Delta k}{k} \right)_{H_1} = 0,15.$$

В качестве воздействия использовался узкополосный гауссовский шум. Центральная частота гауссовского воздействия изменялась в диапазоне от 18,5 до 20,0 Гц, при этом собственные частоты диагностируемых объектов каждого из классов ($\omega_0 | H_0 = 19,47$, $\omega_0 | H_1 = 19,19$ Гц), полученные из выражения (2), находились внутри указанного диапазона. Значение параметра релеевской огибающей сигнала возбуждения $b = 1,3 \cdot 10^3$, скорость изменения частоты составляла 0,5 Гц/с. Полученные при помощи моделирования резонансные колебания диагностируемого объекта были подвергнуты кратковременному преобразованию Фурье. В работе использована вторая гармоника резонансных колебаний, т. е. $i = 2$. Выбор второй гармоники объясняется [9] ее более высокой чувствительностью к наличию трещины по сравнению с другими гармониками, что является особенностью нелинейного поведения объекта диагностики, описываемого системой уравнений (1). В качестве диагностических признаков использованы: новые признаки — действительная и мнимая составляющие преобразования Фурье; традиционный диагностический признак — спектральная плотность мощности. Интервал дискретизации при моделировании был принят равным $\Delta t = 2,5 \cdot 10^{-3}$ с. При этом длительность сигнала t_1 увеличивается с 2,49 до 2,54 с. В работе [9] также исследовалось влияние просачивания на чувствительность диагностических признаков. Параметр просачивания ξ [12], характеризующийся количеством нецелых периодов колебаний, содержащихся в обрабатываемом сигнале, находился в интервале $[0, 1]$. При ξ , принадлежащем интервалу $(0; 1)$, эффект просачивания существует, для случаев $\xi = 0; 1$ просачивание отсутствует. Число экспериментов при моделировании равно 5000 для каждой из гипотез (H_0 или H_1) и для каждого значения параметра просачивания ξ . В таблице приведены значения критериев Фишера F_{new} и F_{PSD} для 11 экспериментов, в которых параметр просачивания ξ изменился.

Поскольку определение параметра просачивания для случая изменяющейся частоты воздействия представляет определенную сложность, то для соопасления данных таблицы со значениями ξ использовались работы, ранее опубликованные по данной теме [4, 5, 13]. Исходя из этих работ, а

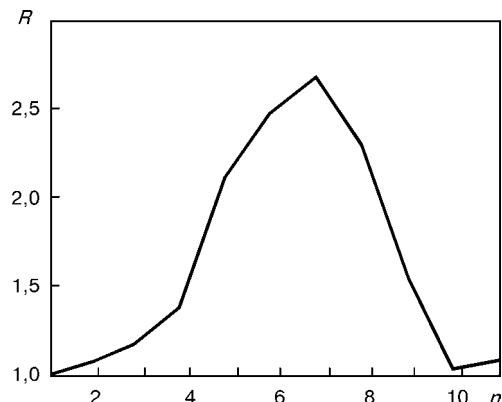


Рис. 2. Зависимость относительной эффективности новых признаков R от номера эксперимента n

также физической сути явления просачивания, можно предположить, что минимальные значения критерия Фишера из таблицы будут соответствовать значениям параметра просачивания в диапазоне $0,4 \dots 0,6$, а максимальные — вблизи 0 и 1. Очевидно, что каждому номеру эксперимента будет соответствовать значение параметра просачивания из интервала $[0; 1]$.

На рис. 1 представлены зависимости критериев Фишера, описываемые уравнениями (5), (6), от номера эксперимента для новых признаков и спектральной плотности мощности. Для всех значений параметра ξ , принадлежащих интервалу $(0; 1)$, критерий Фишера F для предложенных новых признаков [1, 2] выше, чем для традиционного диагностического признака — спектра мощности. Это указывает на то, что диагностика на основе новых признаков имеет более высокую эффективность, чем на основе спектральной плотности мощности. Рассмотрим отношение R эффективностей диагностики по критерию Фишера для новых признаков F_{new} и спектральной плотности мощности F_{PSD} в зависимости от номера эксперимента:

$$R = F_{\text{new}} / F_{\text{PSD}}, \quad (7)$$

Согласно рис. 2 отношение R , описываемое выражением (7), всегда больше 1 и достигает максимального значения вблизи точки $\xi = 0,5$. Очевидно, что при диагностике усталостной трещины во всем диапазоне значений параметра ξ , принадлежащим $[0; 1]$, примененный новый подход на основе признаков, описываемых формулами (3), оказывается более эффективным по сравнению с традиционным, основанным на использовании спектральной плотности мощности. Эффект просачивания еще более подчеркивает это преимущество.

ВЫВОДЫ

1. Применен новый обобщенный подход [1, 2] к обнаружению структурных повреждений. Его новизна заключается в одновременном использовании в качестве диагностических признаков действительной и мнимой составляющих преобразования

Фурье. Примененный подход обобщает традиционные методы диагностики, основанные на спектральной плотности мощности и фазовом спектре.

2. Рассмотрен метод вынужденных колебаний, использующий в качестве воздействия нестационарный узкополосный гауссовский шум. Приведенные результаты моделирования основаны на анализе сигналов, полученных с использованием нелинейной модели объекта диагностики с усталостной трещиной при возбуждении нестационарным узкополосным шумом. Результаты показывают, что эффективность диагностики усталостной трещины выше при использовании новых диагностических признаков по сравнению со спектральной плотностью мощности, и спектральная плотность мощности не является оптимальным признаком при диагностике трещин. Это подтверждают данные, опубликованные ранее [1–6, 13].

1. Gelman L. M., Braun S. G. The optimal usage of the Fourier transform for pattern recognition // Mech. Syst. and Signal Processing. — 2000. — **15**, № 3. — P. 641–646.
2. Гельман Л. М., Удовенко Л. Н. Новые диагностические признаки на основе одно- и многомерного преобразований Фурье // Технич. диагностика и неразруш. контроль. — 2000. — № 4. — С. 13–16.
3. Гельман Л. М., Удовенко Л. Н. Новые признаки, основанные на преобразовании Фурье для диагностики и распознавания образов // Там же. — 2001. — № 3. — С. 27–28.
4. Diagnostics via Fourier transforms: real and imaginary components vs. power spectral density // Proc. of the 4th Intern. conf. on acoustical and vibratory surveillance methods and diagnostic techniques, CETIM-Senlis, France, 12–14 Sept., 2001.
5. Gelman L. M., Petrunin I. V. New generic optimal approach for vibroacoustical diagnostics and prognostics // Proc. of the symp. on Acoustics, Vellore, India. — Vol. 2. — P. 10–21.
6. Оптимальное использование преобразования Фурье для диагностического метода вынужденных колебаний / Л. М. Гельман, Ю. Ф. Зиньковский, А. А. Миропольский, И. В. Петрунин // Радиоэлектроника. — 2001. — № 12. — С. 34–40.
7. Разработка и изготовление аппаратурного комплекса для диагностики роторных деталей авиационных двигателей: (Отчет по ОКР). — НПО «Славутич»; Руководитель темы Л. М. Гельман. — Киев, 1995.
8. Gelman L. M., Gorpinich S. V. Non-Linear vibroacoustical free oscillation method for crack detection and evaluation // Mech. Syst. and Signal Processing. — 2000. — **14**, № 3. — P. 343–351.
9. Bouraou N. L., Gelman L. M. Theoretical bases of the free oscillation method for acoustical nondestructive testing // Proc. of Noise-Conf'97, the Pennsylvania State University. — 1997. — P. 417–423.
10. Гельман Л. М., Зиньковский Ю. Ф., Петрунин И. В. Спектральный анализ нестационарного узкополосного случайного воздействия // Радиоэлектроника. — 2000. — № 8. — С. 35–40.
11. Young T. Y., Fu K.-S. Handbook of pattern recognition and image processing. — Academic Press. Inc., 1986.
12. Oppenheim A., Schafer R. Digital signal processing / Ed. C. Englewood. — NJ: Prentice Hall, 1975.
13. Гельман Л. М., Зиньковский Ю. Ф., Петрунин И. В. Эффективность использования действительной и мнимой составляющих преобразования Фурье для диагностики усталостных трещин // Технич. диагностика и неразруш. контроль. — 2001. — № 4. — С. 21–23.



ОСОБЕННОСТИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ СТРОИТЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ

В. А. ТРОИЦКИЙ

Показана необходимость развития специфических методов неразрушающего контроля (НК) качества железобетона и бетона, находящихся в продолжительной эксплуатации. Созданы специальная оснастка и соответствующие методики для НК ванной сварки арматуры, определения внутренних полостей и осмотра труднодоступных зон; описаны особенности термо- и радиографии для строительных сооружений.

The paper demonstrates the need to develop specific methods of nondestructive testing (NDT) of the quality of concrete and beton in long-term service. Special fixtures and appropriate procedures have been developed for NDT of bath welding of R-bars, detection of inner cavities and examination of difficult-of-access zones, and features of thermo- and radiography for construction facilities are described.

Существует множество различных видов оборудования для оценки качества бетона, его долговечности, с помощью которых реализуются методы НК, систематизированные в табл. 1. В ней указаны методы и стандарты, которые положены в основу перечисленных испытаний. Первые пять позиций касаются железобетона, остальные — открытого бетона. Старение и разрушение железобетона и бетона происходит по разному, поэтому для них предусмотрены различные НК.

Согласно позиции 1 предполагается измерение с помощью магнитных или вихревоковых датчиков толщины и распределения слоя бетона над поверхностью арматуры. Таким путем определяют расположение, размеры и в определенной мере — состояние металла. Для этих испытаний существуют микропроцессорные приборы, запоминающие и анализирующие результаты контроля. Принципы этих испытаний аналогичны принципам, применяемым для сварных соединений [1, 2]. Для полу-

Таблица 1. Основные виды испытаний железобетона и бетона

№ п/п	Вид испытаний	Определяемый фактор	Описание, стандарты
1	Толщина покрытия бетоном арматуры	Количество и расположение прутьев арматуры, их коррозионное поражение	Для определения глубины и размеров арматуры в железобетоне Стандарт BS 1881:204
2	Глубина науглероживания поверхности бетона	Коррозионное поражение	Прибор определяет количество углерода в поверхности Стандарт ASTM C114
3	Содержание хлоридов	»»	Определение полей на поверхности насыщенных хлоридов Стандарт ASTM C114
4	Разность электрических потенциалов	Интенсивность коррозионного процесса	Измерение электролитической разности потенциалов Стандарт ASTM C876, UNI 9535
5	Удельное электрическое сопротивление	Активность коррозионного процесса, опасность разрушения	Измерение удельного электрического сопротивления
6	Поглощение воды поверхностью бетона	Ухудшение качества бетона	Начальное поглощение поверхностью, оценка водонепроницаемости Стандарты BS 1881:208, DIN 1048, ISO 7031, EN 12364, UNI 9533
7	Водо- и газопроницаемость стен	Причины ухудшения бетона	Воздухо- и водопроницаемость по Figg-технологии Стандарт BS 6576
8	Смачиваемость поверхности стен	Ухудшение качества бетона	Оценка сырости на стенах и ниже. Измерение карбидного насыщения Стандарт BS 6576
9	Изгибающий резонанс	Опасность разрушения	Измерение резонансной частоты Стандарты ASTM C215, BS 1881:209, UNI 9771
10	Сила отрыва стандартного конуса	Прочность бетона в процессе эксплуатации	Вводится внутрь раскрывающийся диск Ø 25 мм, который вырывается Стандарты BS 1881:207, ASTM C900, EN 12399, UNI 9536, 10157
11	Сила вырыва высверленного объема	Прочность на отрыв бетона в сооружении	Высверливается кольцевая канавка Ø 50 мм, к внутренней части приклеивается отрывное устройство Стандарты ISO 4624, NF P34501/301, EN 12618 и другие



чения представления об общей картине выполняют сканирование всей поверхности сооружения.

Позиции 2, 3 касаются оценки науглероживания поверхности и содержания в ней хлоридов. Эти испытания выполняются, например, в соответствии с американским стандартом ASTM C114. Науглероживание поверхности происходит из-за деградации углеродистой стали, из которой изготовлена арматура. Повышенное содержание хлоридов и их попадания в железобетон вызваны загрязнениями поверхности солями, используемыми в зимний период от обледенения. Хлориды сильно разрушают железобетон. Оценка хлоризации и науглероживания выполняется с помощью наборов химических реагентов, которые дают определенную цветовую ориентацию на характер и степень поражения сооружения.

Следующим видом испытаний (позиция 4) является измерение электрохимического потенциала (рис. 1). Эта процедура нормируется большим числом стандартов, например BS 1881:201, ASTM C876, UNI 9535, и нашла широкое применение для оценки коррозионного поражения трубопроводов и других металлоконструкций.

Скорость коррозионного разрушения арматуры оценивается также и по изменению удельного электрического сопротивления (позиция 5). Для этого используются цифровые приборы, которые имеют в качестве датчиков два электрода, перемещаемые на поверхности сооружения. Всемирно известная фирма «Controls» [3] выпускает специализированные многофункциональные приборы, которые могут измерять: электрохимический потенциал, электрическое удельное сопротивление, толщину покрытия над арматурой и ее размеры. Результаты всех этих испытаний документируются. Первые пять позиций касаются испытаний поверхности и приповерхностных слоев железобетона.

Для оценки качества собственно бетона применяют (позиции 4–6) методы оценки водо- и газопроникновения, степени смачиваемости поверхности и механических характеристик (прочности на сжатие, изгибающий момент, вибрацию). Механические испытания широко освещены в отечественной литературе и здесь не описываются.

Водо- и газопроницаемость оцениваются приблизительно одинаково. В бетоне высверливается небольшое отверстие, например, диаметром 10 мм и глубиной 40 мм, которое запечатывается силиконовой пробкой. Через пробку пропускается полая игла. В этот объем до определенного давления нагнетается воздух или жидкость. По интенсивности убыния давления судят о проникающей способности бетона. Кроме того, существует большое количество различных механических испытаний, наиболее оригинальные из которых (позиции 9–11) указаны в табл. 1 и поясняются рис. 2. Так, в соответствии со стандартами, указанными в табл. 1, на поверхность бетонного сооружения наклеивается отрывное устройство, с помощью которого вырывают подрезанную пробу, нормируется сила вырыва. На том же рис. 2 также показано устройство 3, которое реализует аналогичные прочностные испытания, но посредством вырывания конуса (на

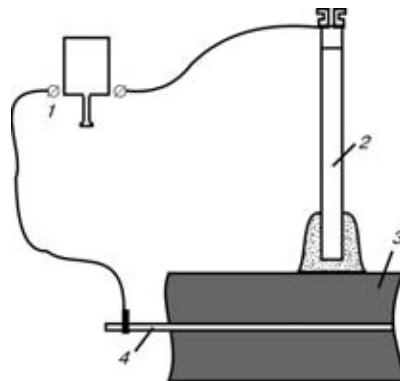


Рис. 1. Измерение электрохимического потенциала: 1 — прибор; 2 — электрод; 3 — бетон; 4 — арматура

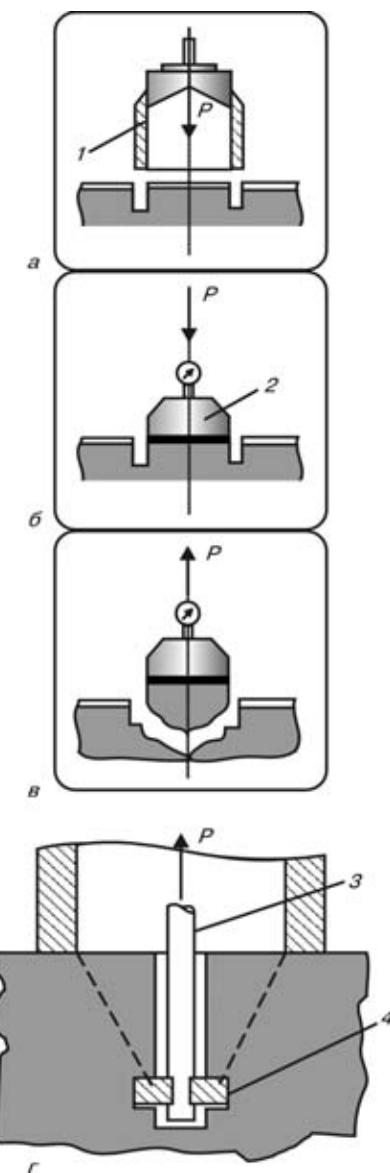


Рис. 2. Испытание бетона на прочность: а — вырезание фрезой 1 круглой канавки; б — на поверхность бетона наклеено отрывное устройство 2; в — момент отрыва; г — устройство 3 вырывает конус с помощью разъемного кольца 4, введенного в бетон; Р — прикладываемая нагрузка

рисунке показан пунктиром). Здесь после засверловки отверстия, определяющего высоту вырываемого конуса, вводится самораскрывающаяся фре-

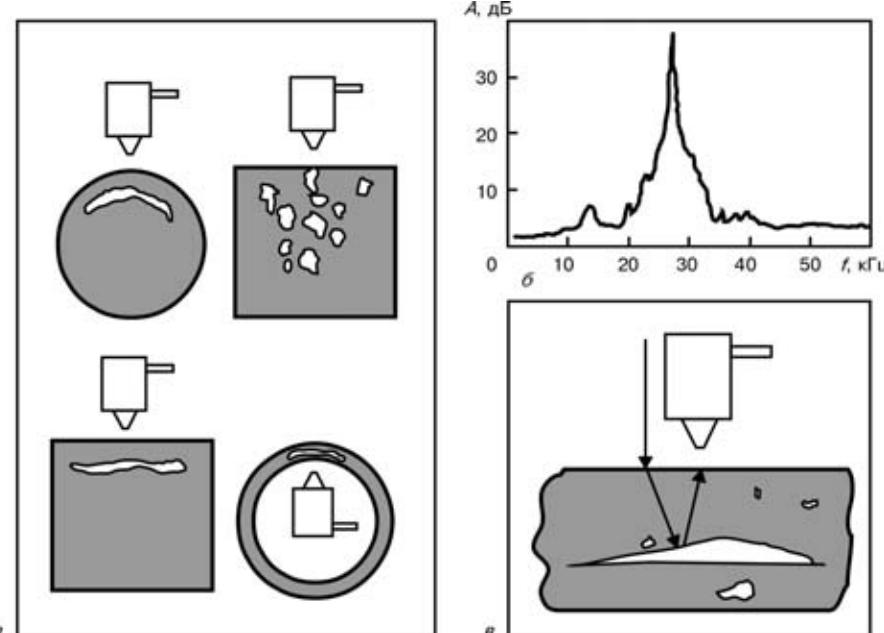


Рис. 3. Импедансный метод обнаружения несплошностей в бетоне: *а* — для разных профилей; *б* — частотная характеристика отраженного сигнала; *в* — схема воздействия на бетон постукивающим устройством

за, которая определяет диаметр вершины конуса. Оба последних испытания на прочность касаются эксплуатируемых объектов для оценки их возможностей.

При строительстве и диагностике эксплуатируемых сооружений, кроме показанных в табл. 1, широко используется рентгеновский и ультразвуковой контроль (УЗК), применяют целый ряд специфических видов НК. Они касаются качества бетона, кладки, прилегания и толщины покрытий, расположения и коррозионного поражения арматуры, наличия полостей и состояния деревянных элементов сооружения.

Качество бетона вскоре после его формирования, а также после продолжительной эксплуатации оценивается с помощью низкочастотного УЗК. Под нагрузкой бетон деформируется, и разрушение наступает как результат микрорастяжения. С помощью УЗК определяют плотность и наличие полостей в кладке. Прогрессирующее старение железобетонных сооружений вблизи автомобильных трасс связано с химическим воздействием на бетон загрязнений, имеющихся на поверхности от хлоридов, используемых зимой для исключения обледенения. Для обнаружения несплошностей в бетоне широко применяется импедансный метод (рис. 3). По частотам, отраженным от несплошности, судят о размерах отслоений, рыхлот и других дефектов. Суть метода состоит в том, что зондирование производят постукиванием по поверхности с записью амплитуды и частоты отраженных колебаний.

Кроме импедансных испытаний используют еще несколько видов акустических испытаний. Это эхо-метод с помощью УЗ-излучателей и соответствующих антенных приемников, а также метод оценки скорости звука в бетоне. Эхо-метод широко применяется в УЗК сварных соединений.

Обнаружить в бетоне внутренние трещины, расслоения, пустоты и т. п. при доступе к конструкции

с одной стороны можно с помощью, например, специализированного ультразвукового прибора [8], работающего на низкой частоте. Этот прибор определяет малые инородные включения в бетоне, пустоты объемом порядка 30 см^3 , и строительные элементы, например трубы, диаметром более 15...20 мм, относительно глубоко расположенные несплошности. Для регистрации отраженных сигналов в приборе используется 36-элементная антenna решетка с расположением элементов на плате $60\times 60\text{ мм}$. Синтез апертуры происходит при последовательном переборе всех возможных пар элементов решетки, используемых для излучения и приема ультразвуковых импульсов, а также при перестановке всей решетки по поверхности обследуемой конструкции.

Метод зондирования пространства парами элементов антенной решетки позволяет эффективно выделять полости на фоне структурного шума бетона. Передача УЗ происходит через конический протектор. Каждый элемент решетки может перемещаться вдоль своей оси и прижиматься к поверхности бетона независимо от других элементов. Это позволяет контролировать конструкции с неровностями поверхности до 8 мм.

Длительность рабочих ультразвуковых сигналов данного прибора примерно равна 35 мкс при средней частоте спектра сигналов 55 кГц. Шаг установки элементов антенной решетки равен 20 мм, а шаг сканирования самой решетки вдоль поверхности обследуемой конструкции можно менять от 20 до 200 мм. Переменный шаг сканирования позволяет проводить либо быстрое обследование больших поверхностей, но с невысокими характеристиками обнаружения, либо подробное, но медленное обследование с достижением максимальных возможностей аппаратуры. Часто такие приборы называют УЗ-томографами, поскольку по отраженным сигналам удается построить внешние контуры

пустот. В отличие от рентгеновского подобного контроля УЗ-томограф не видит задней стенки полости, но четко рисует контуры и рельеф поверхности дефекта. Такой томограф представляет собой антенное устройство, которым оператор вручную сканирует обследуемый объект, и персональный компьютер, отображающий полезную информацию в виде томограмм В- или С-типа. Зондирование длится примерно 10...15 с. В течение этого времени оператор удерживает антенное устройство в прижатом состоянии. Затем он переставляет антенное устройство в следующее положение. Таким образом обследуется вся поверхность объекта. В работе [6] приведены томограммы каналов и полостей диаметром 30 мм на глубине 13; 160; 345 мм. Плохо уложенный бетон приводит к повышенным шумам, что наблюдалось в фундаментах некоторых зданий.

Интегральное определение прочности бетона получают по результатам изменения скорости УЗ колебаний (рис. 4, а, б). Этот способ применяется вместо прямых механических испытаний кернов, вырубленных из бетонного сооружения. Выполняя УЗК этих кернов параллельно с механическими испытаниями, получают зависимости, например, прочности на сжатие и скорости УЗ-колебаний и т. п. Для таких испытаний важны правильный выбор мест для выбурения кернов и измерения скорости звука, а также исключение влияния поверхностных слоев, которые по прочности обычно сильно отличаются от внутренних слоев. Поверхностные слои испещрены мелкими дефектами и перенасыщены веществами, активирующими процесс разрушения.

Имеется возможность [8] определять скорость распространения продольной волны в глубинных слоях исключая из рассмотрения поверхностный слой с отличным составом и насыщенный микродефектами структуры. Поэтому применяют или дифференциальную схему измерений, или определение градиуровочной зависимости скорости продольной УЗ-волны от прочности бетона на сжатие [1, 8] при испытании кернов с удаленным поверхностным слоем, что оговаривается в стандартах. Таким образом, акустические методы (импедансный, эхо- и измерения скорости) позволяют определять как подповерхностные, так и глубинные полости, оценивать прочностные свойства бетона.

Для диагностики бетонных элементов широко применяются мощные рентгеновские излучатели, например бетатроны, а также высококачественная пленка [2, 5], поскольку в данном случае нарушаются традиционные фокусные расстояния, режимы просвечивания и т. д. Преимущества радиографии в строительных сооружениях — высокая чувствительность и высокая разрешающая способность, возможность определения линейных размеров дефекта, документирование, что сложно реализуется при УЗК.

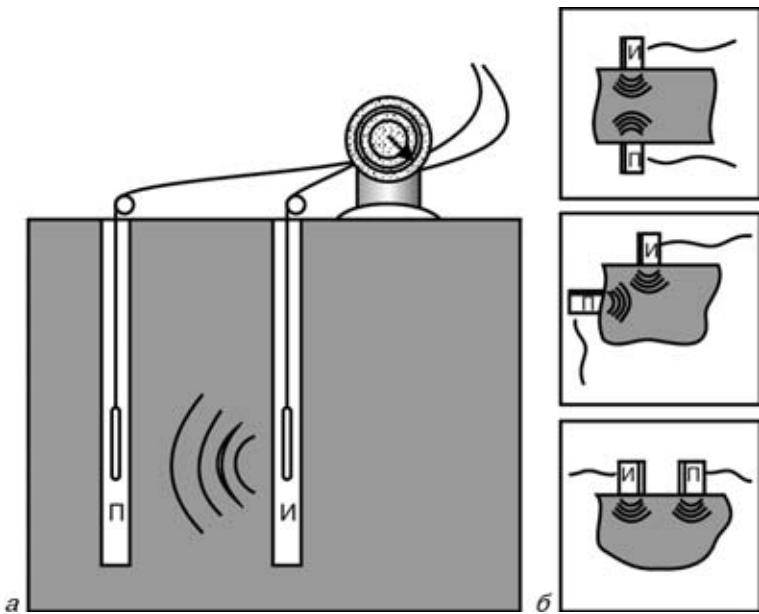


Рис. 4. Оценка качества бетона по скорости звука: а — через отверстия, заполненные водой; б — через акустический контакт в вязкой среде; П — приемник; И — источник

Качество радиографического контроля (рис. 5) зависит от многих факторов: энергии первичного излучения, уровня рассеянного излучения, плотности и толщины просвечиваемого материала, формы и мест расположения дефектов по толщине исследуемого объема, условий просвечивания (геометрических размеров источника ионизирующего излучения, его фокусного пятна или активной час-

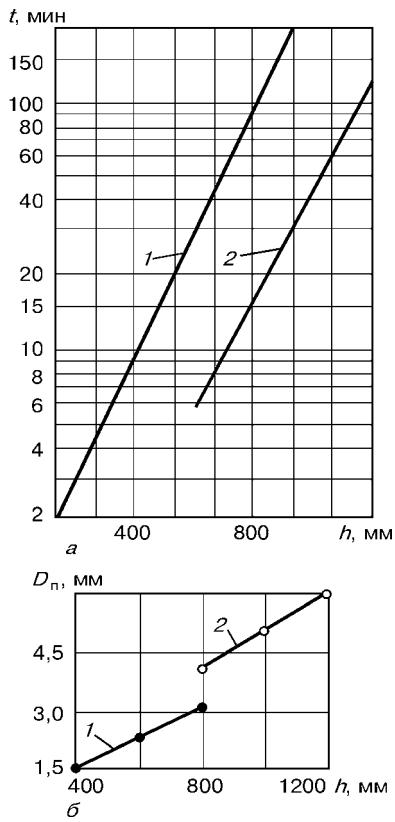


Рис. 5. Зависимость времени экспозиции t от толщины бетона h (а) и выявляемости (б) арматуры для: 1 — пленки D7; $F = 1250$; $D = 2,0$; 2 — пленки PM = K; $F = 1600$ мм; $D = 1,5$; D_n — диаметр стального прутка



Таблица 2. Основные характеристики рентгенографических пленок

Класс	Тип зернистости	Качество снимка	Чувствительность
C1; C2	Очень мелкодисперсная	Очень высокое	Очень низкая
C3; C4	Мелкозернистая	Высокое	Низкая
C5	Средняя	Среднее	Средняя

ти, размеров поля облучения, фокусного расстояния, расстояния между кассетой и объектом контроля, направления излучения к объекту контроля), оптической плотности и контрастности снимка, качества пленок, усиливающих экранов и т. д.

Для получения четких снимков необходимо выполнять основные требования: размеры фокусного пятна рентгеновской трубки и активной части гамма-источника должны быть как можно меньшими, а фокусное расстояние — максимально возможным; радиографическую пленку следует плотно прижимать к поверхности исследуемого объекта; размер поля облучения нужно стремиться уменьшить; направление излучения должно определяться законами проектирования. Радиография бетонных сооружений существенно отличается от радиографии металлоконструкций.

Чувствительность радиографического контроля в значительной степени зависит от качества применяемой радиографической пленки, усиливающих экранов и процесса химико-фотографической обработки. Контрастность пленки, ее чувствительность и гранулярность взаимосвязаны между собой. Высокочувствительные пленки имеют крупные зерна и низкий предел разрешения, а низкочувствительные — мелкие зерна и высокий предел разрешения. Желательно иметь пленку с как можно меньшим временем экспонирования, однако использование высокочувствительной пленки ограничивается ее зернистостью, которая в значительной мере и определяет качество изображения. В табл. 2 приведены классификационные параметры пленок, которые следует анализировать в зависимости от условий просвечивания и свойств объекта. Правильный выбор пленки и излучателя в значительной мере определяет успех контроля.

В настоящее время широкое применение получили пленки производства фирм «АГФА-ГЕВАРТ» (Мортсель, Бельгия), «ФОМА» (Градец-Кралове, Чехия), «КОДАК» (Шалон, Франция), «ФУДЖИ» (Япония). Они сертифицированы на соответствие стандартам ISO 9000.

На рис. 5 приведены графики экспозиций и выявляемости арматуры (железных прутьев) в бетоне при его толщине до 1200 мм. При этом использовался бетатрон МИБ-7,5, аналогичный МИБ-6, имеющемуся в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины. Из этих рисунков следует, что экспозиции могут быть от нескольких минут до нескольких часов, что существенно зависит от типа пленки и технологии просвечивания.

Кроме ультразвуковых и рентгеновских средств для определения полостей, механических напряжений в строительных металлоконструкциях может быть использована инфракрасная (ИК) термография [12, 13]. В ходе ИК-съемки записывают наиболее опасные места на видеомагнитофон в виде «ИК-фильма» со звуковыми комментариями. Термовизор имеет широкий диапазон изменения чувствительности. С его помощью можно регистрировать температуру поверхности с чувствительностью до 0,1 °C. Легко обнаруживаются скрытые пустоты, влагосодержащие зоны, отклонения без каких-либо внешних проявлений. Существует пассивный и активный способы термографии. В последнем случае в объект вводится прямо и косвенно дополнительное тепло. Интересные результаты по количественной оценке обнаруженных дефектов дают повторные съемки. Интервал времени определяется массой контролируемого объекта и его тепловой постоянной времени. Поэтому в стационарном режиме обнаруживаются крупные дефекты за счет неадиабатического теплообмена с окружающей средой. Повысить выявляемость мелких дефектов можно за счет нестационарной тепловой стимуляции.

Интересны наблюдения за тепловыми преобразованиями механической деформации в тепловую энергию. В работе [12] описаны исследования по термографическому анализу процессов механического циклического нагружения. Локальное повышение температуры в области растущей усталостной трещины в строительных, бетонных балках, узлах их крепления хорошо фиксируются по изменению температуры поверхности. Таким образом, циклические нагрузления бетонных конструкций, как и металлических, могут приводить к аномальному тепловыделению в местах сопряжений элементов. В «живом» здании обычно имеются многочисленные источники теплового излучения, которые проявляют различные строительные дефекты и маскируют проявление механических напряжений. Поэтому термография применима при обследовании в объемах относительно спокойных в термическом отношении объемов типа лестничных маршей, мостовых, шахтных креплений и т. п.

Термовизор TH-7102 MX /WX (Япония) имеет следующие технические характеристики: стандартный диапазон измеряемых температур $-40 \dots 500^{\circ}\text{C}$ ($-20 \dots +250$ для модели MX); температурная чувствительность $\pm 0,08^{\circ}$ при $t = 30^{\circ}\text{C}$; погрешность измерения $\pm 22\%$ от полной шкалы; минимальное фокусное расстояние от 50 см до ∞ ; запись термограмм цифровая, на взаимозаменяемые PCMCIA карты емкостью до 16 Мбайт и выше; продолжительность работы от аккумулятора емкостью

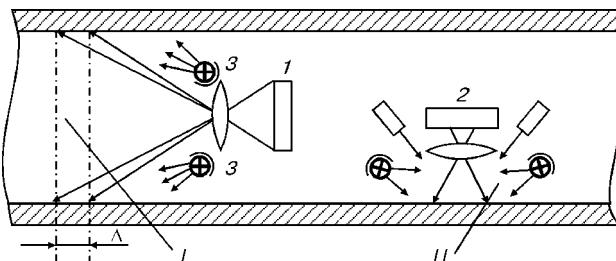


Рис. 6. Схема телевизионного эндоскопа, диагностирующего поверхность трубопровода диаметром 40 мм: 1, 3 — продольного; 2, 4 — перпендикулярного к поверхности трубы; I — зона резкости прямого обзора; II — повернуто на 90°

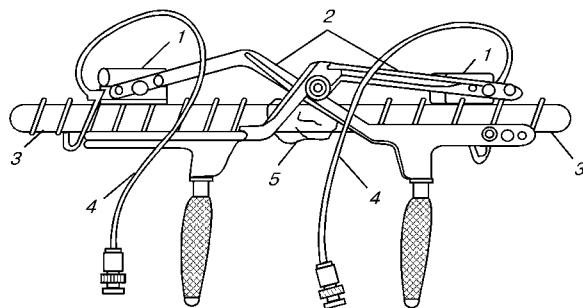


Рис. 7. УЗК-клещи для оценки качества сварных соединений арматуры: 1 – акустические преобразователи; 2 – элементы разъемной части клещей; 3 – свариваемые части арматуры; 4 – высокочастотные кабели; 5 – сварной шов

1250 мА·ч – 110 мин; дисплей цветовой, 5-дюймовый, съемный, жидкокристаллический; функция анализа термограмм – измерение в точке (до 10 точек), выделение области (до 5 областей с определением MAX, MIN и средней температуры); функция записи речевых и текстовых комментариев к каждой термограмме – голосовая и текстовая аннотация к каждой термограмме; диапазон рабочих температур –15...50 °С; габаритные размеры – 97×110×169 мм; масса прибора с аккумулятором – 1,69 кг.

Важную разновидность визуальной информации о дефектах в сооружениях получают с помощью телевизионных эндоскопов [4, 11]. По данным известной американской фирмы «Kues», которая занимается ремонтом различных сооружений, только визуальная информация является основанием в определении способа последующего ремонта. Это касается прежде всего скрытых полостей конструкции, которые могут быть обследованы с помощью эндоскопов. В Институте электросварки им. Е. О. Патона НАНУ разработана серия таких эндоскопов, которые могут быть введены в полость диаметром от 40 мм и выше в труднодоступные места строительных сооружений. Информация выводится на дисплей, обрабатывается и запоминается.

Для оценки провисания, деформации отдельных элементов конструкций, кроме традиционных геодезических средств, в последнее время широко используется лазерная техника. Таким образом, для оценки долговечности и качества бетона, кладки, арматуры существует целый набор специализированных методик и аппаратуры, которые определяют: стойкость (срок службы) бетона; оценку напряженного состояния; качество и целостность кладки; измерение трещин, полостей, протяженности, деформаций, провисания отдельных элементов, качества и температуры бетона перед его заливкой; проверку расположения металла.

Для оценки качества сварных соединений арматуры, выполняемых ванной сваркой, в ИЭС им. Е. О. Патона разработаны специальные приспособления (рис. 7), получившие название УЗК-клещи. С помощью этих устройств определяется качество стыковых сварных соединений. В ИЭС им. Е. О.

Патона разработаны методы оценки качества сварки пластмассовых изделий, в том числе трубопроводов.

Бывают наивные представления о возможности сооружения и эксплуатации пластмассовых сварных соединений без НК. Уже известны разрушения полиэтиленовых трубопроводов, выполненных без НК. Особый раздел НК строительных конструкций и сооружений представляют испытания без снятия обшивок коробов, теплопроводов и других защищенных полостей, а также трубопроводов без снятия изоляции, зачистки металла. Для этих целей в ИЭС им. Е. О. Патона применяют специализированные радиографические методы, например, просвечивание [15] по касательной к образующей поверхности или УЗК без зачистки с использованием особых приспособлений и градуировочных кривых.

Таким образом, для НК и технической диагностики строительных конструкций, железобетона и бетона применяют значительно больше разнообразных методов контроля качества, чем для металлоконструкций. Развитие и широкое внедрение этих методов будет способствовать предотвращению серьезных аварий.

1. Троицкий В. А. Краткое пособие по контролю качества сварных соединений. – Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1997. – 225 с.
2. Троицкий В. А. Пособие по радиографии сварных соединений. – Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 2000. – 266 с.
3. Non destructive test equipment for Concrete. Каталог фирмы «Controls». – 2001. – 72 с.
4. Кеткович А. А., Филинов М. В. Компьютерная телевизионная дефектоскопическая система ДХ2 для контроля внутренней поверхности трубопроводов // Контроль. Диагностика. – 1998. – № 1. – С. 45–46.
5. Чахлов В. Л., Штейн М. М., Касьянов В. А. Малогабаритные бетатроны для дефектоскопии // Там же. – С. 51–33.
6. Шевалдыкин В. Г., Козлов В. Н., Самокрутов А. А. Контроль бетона ультразвуковым эхо-импульсным томографом с сухим контактом // Там же. – № 1.
7. Колинз К. Высокоэффективный рентгеновский контроль нефте- и газопроводов // В мире неразрушающего контроля. – 2001. – № 1. – С. 31–34.
8. Штенигер В. Г. Учет особенностей поверхностных слоев бетона при испытании кернов и использовании методов НК // Там же. – 2001. – № 2. – С. 41–44.
9. ГОСТ 17624–87. Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности. – М.: Изд-во стандартов, 1987.
10. Будадин О. Н., Вавилов В. П., Абрамова Е. В. Автоматизированный тепловизионный комплекс оперативного мониторинга теплотехнических характеристик зданий и сооружений // Контроль. Диагностика. – 2001. – № 2.
11. Телевизионный эндоскоп для визуального контроля труднодоступных объектов / В. А. Троицкий, В. И. Загребельный, А. Н. Дзыгальский и др. // Сварщик. – 2001. – № 6.
12. Вавилов В. П. Инфракрасная термография механических напряжений в строительных конструкциях (диагностика казармы ТВВКУС в г. Томске после катастрофы) // Контроль. Диагностика. – 1998. – № 1.
13. Oliver D. E. Stress pattern analysis by thermal emission (SPATE). Dynamic stress analyser. – Ometcol Lts Publ. V. K., 1986. – 4 р.



СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ МОНТАЖНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ОПОРНЫХ БЛОКОВ МОРСКИХ СТАЦИОНАРНЫХ ПЛАТФОРМ

Э. Ф. ГАРФ, Э. М. ДЫСКИН, П. С. ЮХИМЕЦ

Обоснована возможность перехода на выборочный контроль качества сварных соединений на основании систематических наблюдений за качеством монтажных сборочно-сварочных работ при сооружении опорных блоков (ОБ) морских стационарных платформ (МСП). Показано, что наиболее часто встречающиеся дефектами монтажных кольцевых сварных соединений ОБ МСП являются смещения кромок и подрезы. На примере расчета оперативной характеристики плана контроля обнаружения трещины выполнен анализ риска изготовителя и потребителя указанных конструкций.

The paper substantiates the possibility of going over to selective control of the quality of welded joints, based on systematic observation of the quality of assembly-welding operations in construction of columns of off-shore platforms (OSP). It is shown that the most often found defects of field circumferential joints of OSP columns are edges displacement and undercuts. Calculation of the operative parameter of crack detection control plan was used as an example to perform analysis of the risks of the manufacturer and user of the above structures.

При сооружении уникальных ответственных сварных конструкций нормативно-технической документацией предусматривается, как правило, сплошной контроль готовых сварных соединений. Вместе с тем осуществление такого контроля в некоторых случаях сопряжено с серьезными техническими трудностями, что обуславливает рассмотрение возможности перехода к ограниченному выборочному контролю и оценке сопряженных с этим рисков.

Во время сооружения опорных блоков (ОБ) морских стационарных платформ (МСП) на Бакинском заводе стационарных глубоководных оснований в течение трех лет велись систематические наблюдения за строительством с целью сбора статистических данных об уровне монтажных сборочно-сварочных работ и качестве готовых сварных соединений. Строительные работы велись на стапелях на берегу Каспийского моря. Использовалась ручная электродуговая сварка покрытыми электродами УОНИ-13/55. Корневые проходы выполнялись электродами фирмы Kobe Steel (Япония), дающими обратное формирование шва марки LB-52U. Выбор ручной сварки объясняется тем, что данный способ наиболее доступен, гибок, не требует применения сложного и дорогостоящего оборудования, широко распространен в строительстве. При этом достигается высокое качество сварных швов при различной толщине свариваемого металла, в т. ч. в труднодоступных местах, образуется равнопрочное сварное соединение, однородное по химическому составу, структуре и механическим свойствам.

При проведении обследований частично или полностью законченных блоков особое внимание уделялось состоянию кольцевых стыков трубчатых элементов узлов панелей и межпанельного заполнения диаметром 550...900 мм и толщиной стенки 12...20 мм, стыков элементов и узлов стоек (в первую очередь стапельных) диаметром 1784...1820 мм и толщиной стенки 32...50 мм, а также поперечных стыков элементов спускных балок с толщиной

металла 40...50 мм. Контролю подлежали только тесты, которые сваривали при монтаже на стапелях. Наблюдения вели выборочно со стапелей, приставных лестниц, подмостей и непосредственно с элементов панелей при горизонтальном их положении до подъема и с люлек после их подъема. Стыки подвергали визуальному контролю с использованием лупы с 5-кратным увеличением. Фиксировали все дефекты, регламентированные нормативной документацией. Особое внимание уделялось выявлению в швах наружных поверхностных трещин. Всего было проконтролировано 5020 стыков, из которых 4100 принадлежали элементам заполнения, а 920 — элементам стоек. Визуальный контроль части стыков, швы которых отличались более грубой чешуйчатостью и глубокими межваликовыми западаниями, дублировался методом магнитопорошкового контроля с использованием постоянного магнитного поля с подачей порошка на стык распыленным в виде эмульсии. Одновременно с обследованиями был ужесточен операционный контроль на всех стадиях изготовления и монтажа элементов и узлов ОБ, контроль

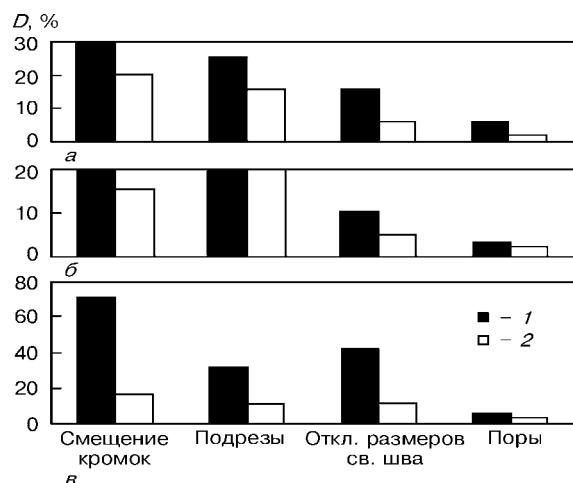


Рис. 1. Дефектность D монтажных сварных стыков ОБ МСП до (1) и после (2) ужесточения контроля качества заготовки сборки и сварки: *а* — кольцевых стыков элементов заполнения; *б* — стоек; *в* — поперечных стоек элементов спускных балок



Характер и вероятность наиболее распространенных дефектов в сварных соединениях

Вид дефекта	Вероятность			
	образования дефекта P_i	отсутствия дефекта P_i^*	образования бездефектного сварного соединения P	образования дефектного сварного соединения P^*
Кольцевыестыки элементов заполнения				
Подрез	0,15	0,85	0,64	0,36
Поры	0,01	0,99	—	—
Недопустимое смещение кромок	0,20	0,80	—	—
Отклонение размеров сварного шва	0,05	0,95	—	—
Кольцевыестыки стоек				
Подрез	0,15	0,85	0,63	0,37
Поры	0,02	0,98	—	—
Недопустимое смещение кромок	0,20	0,80	—	—
Отклонение размеров сварного шва	0,05	0,95	—	—
Поперечныестыки элементов спускных балок				
Подрез	0,10	0,90	0,67	0,33
Поры	0,02	0,98	—	—

качества и подготовки к сварке сварочных электродов, а также уровня подготовки и квалификации сварщиков-монтажников.

Сбор и обработка данных о наиболее распространенных видах дефектов, их характере и повторяемости в сварных монтажных соединениях различных узлов и элементов до и после ужесточение контроля показали результаты, которые представлены на рис. 1. Как видно из него, наиболее распространенными дефектами являются подрезы и смещения кромок. Наблюдается тенденция к снижению числа отдельных видов дефектов после ужесточения контроля.

Используя данные рис. 1, определим вероятность изготовления бездефектного сварного соединения после ужесточения контроля. Соответствующие результаты расчета вероятности отсутствия дефектных сварных монтажных стыков приведены в таблице. Вероятность обнаружения бездефектного сварного соединения P с учетом взаимной независимости появления дефектов различных видов находили перемножением всех значений P_i^* для данного типа соединения. Вероятность обнаружения сварного соединения хотя бы с одним дефектом

P^* определяли исходя из того, что данное событие и появление бездефектного сварного соединения являются парой противоположных событий, сумма вероятностей которых $P + P^* = 1$. Как следует из таблицы, наименее дефектными являются поперечныестыки элементов спускных балок. В целом значения дефектности монтажных стыков трех видов имеют близкие значения, что обусловлено использованием общей технологии их производства.

Известно, что при производстве сварочных работ выполнение всех требований, предъявляемых к технологическому процессу, в большой мере определяет физико-механические свойства готовых сварных соединений, в том числе сопротивляемость металла шва и околосшовной зоны возникновению горячих (криSTALLИЗАЦИОННЫХ) и холодных тре-

щин. Во всех обследованных 5020 сварных монтажных кольцевых стыковых швах не были обнаружены поверхностные трещины, представляющие особую опасность. Сбор максимального числа данных о частоте возможного появления трещин в сварных швах являлся одной из наиболее важных задач проводившихся обследований.

Если условно принять, что трещина была обнаружена при осмотре 5021 стыка, то вероятность ее появления составляет $P_t \approx 0,0002 = 0,02\%$. Полученная вероятность является приближенной. Точное значение будет предельной величиной при стремлении числа испытаний N к бесконечности: $P_t = \lim_{N \rightarrow \infty} K/N$, где K — число стыков с трещинами. Столь малая вероятность появления дефектного стыка дает основание для перехода от сплошного контроля кольцевых монтажных стыков в рассматриваемых конструкциях к выборочному.

Поскольку процесс производства ОБ был установленным и стабильным, для перехода к оценке качества с использованием выборочного контроля необходимо определить план приемочного контроля в соответствии с ГОСТ 18242 «Статистический приемочный контроль по альтернативному признаку» (аналог международного стандарта ABC-STD-105D).

Устанавливаем следующие характеристики:

- тип плана контроля — одноступенчатый;
- приемочный уровень качества (число дефектов на 100 единиц продукции) согласно фактическим данным — 0,02 %;
- объем партии стыков, представляемой на контроль — 1000 (средний объем контроля металлоконструкции ОБ МСП);
- степень контроля — общая II (основная для применения стандарта).

Тогда объем контрольной выборки, отобранный случайным образом, оставляет $n = 800$ кольцевых стыков;

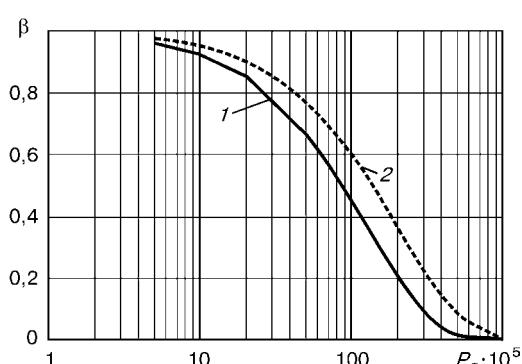


Рис. 2. Оперативная характеристика плана контроля: 1 — $n = 800$; $c_1 = 0$; $c_2 = 1$; 2 — $n = 500$; $c_1 = 0$; $c_2 = 1$

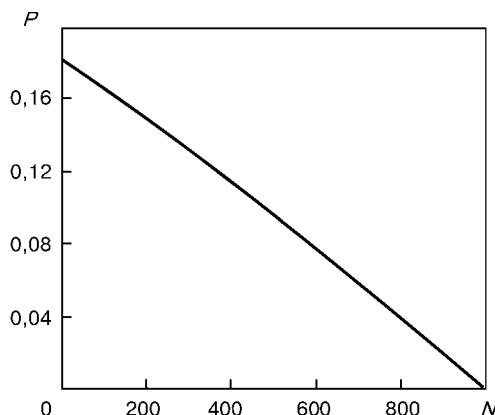


Рис. 3. Зависимость риска пропуска одного и более дефектного стыка P в ОБ МСП от объема N контрольной выборки; общее число стыков в блоке принято равным 1000; $P(N) = 1 - 0,9998^{1000-N}$

приемочное число $c_1 = 0$, браковочное — $c_2 = 1$. Если количество дефектных стыков в выборке равно 0, то вся партия считается имеющей удовлетворительное качество. В противном случае она бракуется, что может означать, например, проведение сплошного контроля оставшейся части партии. Следует отметить, что выбранный план контроля (объем выборки) по ГОСТ 18242 соответствует приемочному уровню качества 0,015 % (ввиду отсутствия в нем плана для приемочного уровня качества 0,02 %) и является консервативным по отношению к существующему производственному процессу.

На рис. 2 представлена оперативная характеристика плана контроля ($n = 800$, $c_1 = 0$, $c_2 = 1$), которая определяет вероятность принятия партии β как функцию среднего значения P дефектных стыков в генеральной совокупности. Для построения оперативной характеристики вычислялось значение вероятности $P(d)$ получения количества дефектных стыков в выборке в зависимости от P_t — средней доли дефектных стыков, когда их число в выборке $d = 0$. Расчет производился на основе биноминального распределения с использованием зависимости

$$P(d) = \binom{n}{d} P_t^d Q^{n-d}, \quad (1)$$

где Q — средняя доля годных стыков; n — объем выборки.

При этом $P + Q = 1$. Отсюда следует:

$$P(0) = \binom{n}{0} P_t^0 Q^{n-0} = \frac{n!}{0!(n-0)!} Q^n = (1 - P_t)^n. \quad (2)$$

Согласно рис. 2 принятый план контроля обеспечивает производству гарантию 85,2 % против браковки партии (риск изготовителя 14,8 %), когда производственный процесс протекает стабильно и генеральная совокупность имеет не более 0,02 % дефектных стыков.

Определим 95 %-ные доверительные пределы, когда случайная выборка из 800 стыков не содержит дефектных стыков. Очевидно, что нижним доверительным пределом в данном случае будет значение $P = 0$, а верхний определится из условия $P(d \geq 1) = 0,95$ или $P(0) = 0,05$. Тогда с учетом формулы (2) $P(0) = (1 - P_t)^{800}$, откуда $P_t = 0,0037$, т. е. если выборка из 800 стыков не содержит дефектных стыков с трещинами, то с вероятностью 95 % можно утверждать, что среднее значение числа дефектных стыков P_t в генеральной совокупности будет лежать в пределах $0 \leq P_t \leq 0,0037$.

Если принять план контроля при $n = 500$, $c_1 = 0$, $c_2 = 1$, то гарантия приемки партии повысится до 90,5 %. Риск изготовителя при этом соответственно снизится до 9,5 %. На рис. 2 приведена оперативная характеристика плана контроля при $n = 500$.

В случае принятия плана контроля при $n = 500$, $c_1 = 0$, $c_2 = 1$ доверительный интервал расширяется до пределов $0 \leq P_t \leq 0,0060$ и, следовательно, возрастает риск потребителя, заключающийся в приемке плохой партии. С точки зрения потребителя выгоднее использовать выборки с большим объемом, так как в этом случае уменьшается риск приема плохой партии.

Таким образом, оценка плана выборочного контроля должна производиться изготовителем и потребителем на основе анализа оперативной характеристики плана и принятия компромиссного решения относительно уровня существующего риска изготовителя и потребителя. При сплошном контроле риск снижается до нуля (рис. 3), однако сплошной контроль не всегда экономически оправдан и технически возможен.

ВЫВОДЫ

- Обоснована возможность перехода на выборочный контроль качества сварных соединений при изготовлении ОБ МСП.
- Показано, что наиболее часто встречающиеся дефектами монтажных кольцевых сварных соединений указанных конструкций являются смещения кромок и подрезы.
- На примере расчета оперативной характеристики плана контроля обнаружения трещины выполнен анализ риска изготовителя и потребителя сварных конструкций ОБ МСП.

ПОЛНОМАСШТАБНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Ю. В. РАДЫШ, А. С. КИРЕЕВ

Проанализированы недостатки существующих версий разрушения материалов - теории предельного состояния и кинетической теории разрушения. Предложена математическая модель поведения конструкционного материала с расширенным пространством термодинамических состояний, которая нашла практическое применение при создании аппаратно-программного комплекса диагностики состояния и прогнозирования надежности конструкций, а также анализа поведения конструкций при длительной эксплуатации.

The disadvantages of the existing versions of material destruction have been analyzed, namely of the theory of the limit state and kinetic theory of fracture. A mathematical model of the structural material behaviour with an expanded space of thermodynamic states has been proposed that has found practical application in development of a hardware-software complex for diagnostics of the condition and forecasting the reliability of structures, as well as analysis of structure behaviour at long-term load.

Новая методология диагностики состояния и прогнозирования надежности конструкций, изложенная в [1], содержит три базовых элемента:

полномасштабную эволюционную модель, наиболее полно описывающую поведение конструкции в условиях эксплуатации;

результаты инструментального (непрерывного, периодического или эпизодического) контроля состояния конструкции, используемые для идентификации ее математической модели;

процедуру диагностики и прогнозирования поведения конструкции, основанную на анализе ее математической модели (математическом моделировании) с использованием фундаментальных критериев качества; к последним относятся критерии прочности, устойчивости, поврежденности, осадки и подвижки основания конструкции.

В контексте решаемых при этом задач важнейшей является построение полномасштабной эволюционной модели состояния конструкционного материала и конструкции в целом в условиях эксплуатации. Как уже отмечалось [1], состояние конструкции описывается полной совокупностью (тензорных) полей различной физической природы, определенных на конструкции во время эксплуатации. К последним относятся поля термодинамических и механических переменных состояния (температура, напряжение, деформация, перемещение и скорость его изменения), которые при необходимости дополняются поврежденностью материала. Такая модель должна описывать как обратимые, так и необратимые процессы, протекающие в различных масштабах времени и приводящие в конечном счете к разрушению конструкции. Основанием для построения модели должны служить фундаментальные законы сохранения вещества, количества движения и энергии (1-й закон термодинамики) вместе с законом возрастания энтропии (2-й закон термодинамики) и термодинамически непротиворечивыми определяющими соотношениями для конструкционного материала.

Условные обозначения используемых физических величин. В работе используются следующие условные обозначения:

t — текущее время;
 y^i — эйлеровы координаты (декартовы прямоугольные координаты наблюдателя);
 x^i — лагранжевы координаты (материальные);
 g_{ij} — метрический тензор материала;
 δ_{ij} — начальный (или остаточный) метрический тензор материала канонического вида;
 $g^{0,5}$ — мера объема материала, $g \equiv + \det[g_{ij}]$;
 ρ — плотность материала;
 $\varepsilon_{1ij}, \varepsilon_{2ij}$ — соответственно упругая и пластическая (остаточная) деформация материала;
 σ^{ij} — полные напряжения материала;
 σ^{*ij} — девиатор напряжений, обладающий свойством $\sigma^{*ij}g_{ij} = 0$;
 σ_h^{ij} — начальные (или остаточные) напряжения материала;
 f^i — массовые силы;
 ω — поврежденность материала;
 E^{ijkl} — модуль упругости материала;
 L_{ijkl} — модуль податливости материала, обратный по отношению к модулю упругости:
 $E^{klkj}L_{pqkl} = E^{ijkl}L_{klpq} = \delta_p^i\delta_q^j$;

k — коэффициент линейной связи вида $\|\dot{\varepsilon}_{2ij}\| = k\dot{w}$;

v — коэффициент положительно определенной диссипативной функции пластического деформирования $(n+1)/n$ -го порядка, вида $v \|\dot{\varepsilon}_{2ij}\|^{(n+1)/n}$,

μ^{ijkl} — коэффициент положительно определенной диссипативной функции упругого деформирования 1-го порядка, вида $(\mu^{ijkl}\dot{\varepsilon}_{1ij}\dot{\varepsilon}_{1kl})^{0,5}$;

σ_0 — пороговая величина напряжений материала;

$$\xi \equiv k^{-1}$$

Все физические величины в работе рассматриваются как тензоры относительно непрерывной группы преобразований пространственной области материала, которые сохраняют ее ориентацию



(движение и деформация). Тензоры определяются своими компонентами в лагранжевой (материальной) системе отсчета как функции лагранжевых пространственных координат и времени. Поскольку в лагранжевой системе отсчета векторный и ковекторный базисы не совпадают, в работе используются как нижние (ковекторные), так и верхние (векторные) индексы компонент тензора, пребывающие значения $i, j, k, l = 1, 2, 3$. Принимается соглашение о суммировании по одинаковым верхним и нижним индексам, при этом символ суммирования не указывается. Подъем и опускание индексов осуществляется с помощью метрического тензора соответственно в векторном g^{ij} и ковекторном g_{ij} представлениях, которые связаны условием

$$g^{kj}g_{ji} = g_{ij}g^{jk} = \delta_i^k.$$

Все экстенсивные физические величины отнесены к единице массы материала. Поэтому соответствующие тензоры приобретают свойства тензорной плотности веса +1 только после умножения на меру массы $\rho g^{0,5}$.

Индекс после запятой у компоненты тензора обозначает операцию частного дифференцирования этой компоненты по лагранжевой координате, соответствующей индексу. Точкой сверху над компонентом тензора обозначается операция дифференцирования этой компоненты по явно содержащемуся времени при постоянных лагранжевых координатах. Символом $\parallel\parallel$ обозначается евклидова норма, которая для тензора σ^{ij} определяется в виде $\|\sigma^{ij}\| \equiv +(\sigma^{ij}\sigma_{ij})^{0,5}$.

Принятые условные обозначения и сокращения обеспечивают возможность записи символьных выражений в наиболее простой форме, сохраняющей необходимые пояснения процедуры используемых операций и преобразований.

Введение в проблему. В настоящее время сформировались две точки зрения (версии) на разрушение конструкционных материалов. По одной версии, более ранней, существует ограниченная область термодинамических состояний материала, при которых сохраняется его прочность. Разрушение происходит при достижении материалом предельных состояний на границе этой области в результате воздействия окружающей среды. Эта точка зрения получила отражение в различных теориях предельного состояния (теориях прочности). В них в качестве переменных состояния обычно рассматриваются компоненты тензора напряжений и температура материала. Существенным недостатком этой версии является невозможность объяснения факта необратимости разрушения конструкционных материалов, состояние которых не достигает предельных значений при длительной эксплуатации в составе конструкций.

По другой, более поздней кинетической версии разрушения, существование границы предельных состояний материала вообще исключается. При этом предполагается, что разрушение происходит вследствие критического накопления в конструкционном материале необратимых структурных из-

менений, при которых изменяются его физические свойства, приводящие к потере прочности. Кинетика накопления изменений в структуре материала зависит от интенсивности воздействия на материал окружающей среды и достигнутого уровня структурных изменений. Эта точка зрения нашла отражение в различных теориях накопления как рассеянных, так и сосредоточенных (теория трещин) повреждений материала. Существенным недостатком этой версии является неспособность обнаружить фундаментальные связи между различными физическими явлениями, которые сопровождают разрушение материала вследствие ограниченного опытом восприятия факта накопления в материале необратимых структурных изменений. Обзор различных представлений и теорий разрушений конструкционных материалов в рамках обеих версий представлен в [2].

При внешнем различии эти точки зрения (версии) не являются альтернативными. В работе [3] они объединяются наиболее естественным образом посредством расширения пространства состояний материала. При этом в рассмотрение вводится дополнительная термодинамическая переменная, характеризующая изменение состояния материала при разрушении. Эта гипотетическая переменная состояния сохраняет заимствованное название поврежденности материала.

Необратимость разрушения материала накладывает на возможные изменения поврежденности односторонние ограничения, выраженные в постулате необратимости. В работе [3] показано, что из постулата необратимости накопления повреждений следует существование поверхности нагружения материала в пространстве его состояний. При этом отвергается необходимость существования нормального диссилиативного механизма 1-го порядка (типа сухого трения) при пластическом деформировании материала, который по установившимся воззрениям [4] связывается с существованием поверхности нагружения материала. В пределах этой поверхности материал может находиться неограниченно долго в неразрушенном состоянии, а за ее пределами разрушается. При этом скорость повреждения материала зависит только от достигнутого им состояния. Последнее обстоятельство определяет поврежденность как скрытую переменную состояния, в отличие от напряжений и температуры материала, которые изменяются непосредственно под воздействием окружающей среды.

Отличительная особенность поврежденности (как скрытой переменной термодинамического состояния материала) позволяет построить эволюционную полномасштабную модель поведения материала в составе эксплуатируемых конструкций, как это выполнено в [3]. Такая феноменологическая модель поведения материала описывает термоупругое и пластическое деформирование вместе с разрушением материала под действием силовых и термических нагрузок с общих аксиоматических позиций термодинамики. Условия термодинамической непротиворечивости определяющих соотношений приводят к необходимости существования механизма гистерезисного трения при упругом де-



формировании материала и различному характеру накопления повреждений при наличии и отсутствии его циклирования. В рассмотренных ниже частных случаях эта модель сводится к описанию явлений деформационной ползучести и релаксации внутренних напряжений в материале. Параметры этой модели достаточно просто устанавливаются по результатам типовых испытаний образцов материалов.

Изотермическая модель. Наиболее просто модель представляется в изотермическом случае, когда температура материала является параметром, в отличие от напряжений и поврежденности материала, которые остаются термодинамическими переменными состояния. При этом разрушение материала рассматривается как термодинамический процесс перехода от состояния устойчивого равновесия цельного материала к состоянию устойчивого равновесия разрушенного материала, каждое из которых принадлежит границе области равновесных состояний. На пути этого перехода поврежденность материала возрастает от начального до конечного значения, которые устанавливают границы шкалы значений поврежденности.

Удовлетворяющая законам сохранения количества движения и энергии (первый закон термодинамики) вместе с законом возрастания энтропии (второй закон термодинамики) полная (замкнутая) система эволюционных уравнений механического и термодинамического движения материала в составе конструкции имеет вид:

$$g_{ij} = (dy^k/dx^i)(dy^l/dx^j)\delta_{kl}; \quad (1)$$

$$\sigma^{ij} = \sigma_h^{ij} + E^{ijkl}\varepsilon_{1kl} + \mu^{ijkl}\dot{\varepsilon}_{1kl}/(\mu^{ijkl}\dot{\varepsilon}_{1ij}\dot{\varepsilon}_{1kl})^{0.5}; \quad (2)$$

$$0.5(g_{ij} - \delta_{ij}) = \varepsilon_{1ij} + \varepsilon_{2ij}; \quad (3)$$

$$\dot{\varepsilon}_{2ij} = \omega k\sigma_{ij}^{*}/\|\sigma^{*ij}\|; \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \dot{\omega} &= \xi((\|\sigma^{*ij}\| - \sigma_0)/v)^n \quad \text{при } \|\sigma^{*ij}\| \geq \sigma_0; \\ \dot{\omega} &= 0 \quad \text{при } \|\sigma^{*ij}\| < \sigma_0; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\rho g^{0.5} \ddot{y}^i - (\rho g^{0.5}(dy^i/dx^k)\sigma^{kj})_j = \rho g^{0.5}(dy^i/dx^k)f^k. \quad (6)$$

Эта система уравнений решается относительно неизвестных искомых функций лагранжевых координат и времени $g_{ij}(x^i, t)$, $\sigma^{ij}(x^i, t)$, $\varepsilon_{1ij}(x^i, t)$, $\varepsilon_{2ij}(x^i, t)$, $\omega(x^i, t)$, $y^i(x^i, t)$ при заданных либо определенных в условиях эксперимента внешних воздействий на материал и характеристики материала f^i , E^{ijkl} , σ_h^{ij} , κ , σ_0 , μ^{ijkl} , v , n , а также при соответствующих начальных и краевых (граничных) условиях, зависящих от постановки конкретной задачи.

Единственное решение задачи вполне определяется заданием в начальный момент времени полей положения (конфигурации), скорости изменения положения, напряжений и поврежденности конструкции

$$y^i(x^i), \dot{y}^i(x^i), \sigma^{ij}(x^i), \omega(x^i). \quad (7)$$

Эти независимые полевые переменные определяют состояние конструкции (механическое и термодинамическое) в изотермических условиях. В неизотермическом случае они при необходимости дополняются полем температуры конструкции. Оценка эксплуатационной надежности конструкции устанавливается по упомянутым выше фундаментальным критериям качества, которые рассчитываются на основании найденного по выражениям (7) состояния конструкции в текущий момент времени и прогноза его изменения в будущем.

Отметим зависимость пороговой величины напряжений от поврежденности $\sigma_0(\omega)$ в уравнении (5). Поскольку ω , согласно соотношению (4), является параметром на пути пластического деформирования, указанная зависимость отождествляется с идеализированной полной диаграммой деформирования материала в координатах $\|\sigma^{*ij}\|$ и ω , полученной в условиях статического приближения. Эти условия требуют принадлежности термодинамического состояния материала в процессе его разрушения к границе области равновесных состояний

$$\|\sigma^{*ij}\| - \sigma_0(\omega) = 0. \quad (8)$$

Рассмотрим вопрос об устойчивости (в малом) состояния равновесия σ^{ij} , ω на границе области равновесных термостатических состояний материала, согласно уравнению (8), при заданных постоянных напряжениях

$$\sigma^{ij} = C^{ij}. \quad (9)$$

При этом условии устойчивость равновесия по переменной σ^{ij} выполняется очевидно, а по переменной ω исследуется ниже на основе 2-го метода Ляпунова.

Функция от переменной ω в левой части равенства (8) является функцией Ляпунова. Действительно, она положительно определена, поскольку принимает положительные значения при всех ω , которые не принадлежат области равновесных состояний

$$\|\sigma^{*ij}\| - \sigma_0(\omega) > 0,$$

а на границе этой области по уравнению (8) принимает нулевое значение. Вычисляя производную этой функции по времени, в силу дифференциального уравнения (5) получим

$$\xi((\|\sigma^{*ij}\| - \sigma_0)/v)^n d\sigma_0/d\omega. \quad (10)$$

Отсюда следует, что на интервалах монотонного возрастания функции $\sigma_0(\omega)$ выполняется условие устойчивости равновесных состояний, поскольку по выражению (10) знак производной функции Ляпунова противоположен знаку самой функции и, наоборот, на интервалах монотонного убывания функции $\sigma_0(\omega)$ выполняется условие неустойчивости. Поэтому у идеализированной полной диаграммы деформирования материала восходящая ветвь устойчива, а нисходящая — неустойчива.



Устойчивость равновесия в точке сопряжения этих двух ветвей указанной диаграммы является неопределенной.

Рассмотрим явление ползучести и релаксации напряжений разрушающегося материала. Ползучесть материала происходит под действием постоянных по значению напряжений согласно равенству (9). В силу дифференциального уравнения (5) скорость пластического деформирования из соотношения (4) при ползучести определяется равенством

$$\dot{\varepsilon}_{2ij} = k\xi((\|\sigma^{*ij}\| - \sigma_0)/v)^n \sigma_{ij}^*/\|\sigma^{*ij}\|. \quad (11)$$

Скорость упругого деформирования материала при ползучести, согласно выражению (2), равна 0. Следовательно, полная скорость деформирования при ползучести является функцией поврежденности материала в текущий момент времени, которая выражается правой частью равенства (11). Накопленная при ползучести полная деформация материала, описываемая формулой (3), вполне определяется приращением его поврежденности

$$0,5(g_{ij} - \delta_{ij}) = \sigma_{ij}^*/\|\sigma^{*ij}\| \int_{\omega_0}^{\omega_t} d\omega, \quad (12)$$

где $\omega_0 = \omega(0)$, $\omega_t = \omega(t)$ — поврежденность материала в начальный и текущий моменты времени.

Релаксация напряжений материала протекает при постоянных во времени полных деформациях материала:

$$0,5(g_{ij} - \delta_{ij}) = C_{ij}. \quad (13)$$

Отсюда, согласно формуле (3), следует выполнение равенства

$$\dot{\varepsilon}_{1ij} + \dot{\varepsilon}_{2ij} = o_{ij}. \quad (14)$$

Пренебрегая значениями ускорений упругого деформирования при релаксации напряжений, из соотношения (2) получим следующие выражения для скорости упругого деформирования:

$$\dot{\varepsilon}_{1ij} = L_{ijkl} \dot{\sigma}^{kl}. \quad (15)$$

В силу дифференциального уравнения (5) скорость пластического деформирования, описываемая соотношением (4), при релаксации напряжений определяется выражением (11). С учетом фор-

мул (11), (15) равенство (14) принимает вид дифференциального уравнения относительно $\sigma^{ij}(t)$:

$$L_{ijkl} \dot{\sigma}^{kl} + k\xi((\|\sigma^{*ij}\| - \sigma_0)/v)^n \sigma_{ij}^*/\|\sigma^{*ij}\| = 0_{ij}. \quad (16)$$

Решение системы дифференциальных уравнений (16), (5) относительно $\omega(t)$, $\sigma^{ij}(t)$ при заданных начальных условиях

$$\sigma^{ij}(0) = \sigma_h^{ij} + E^{ijkl} \varepsilon_{1kl}(0), \quad \omega(0) = \omega_0 \quad (17)$$

определяет изменения поврежденности и напряжений материала при релаксации последних.

Практические приложения. Математическая модель поведения конструкционных материалов, представленная в форме граничной задачи для системы уравнений (1)–(5) состояния конструкции (при расширении на неизотермический случай), нашла практическое применение при реализации упомянутой методологии диагностики и прогнозирования состояния металлоконструкций. На этой методологической основе:

выполнена разработка аппаратно-программного комплекса диагностики текущего состояния и прогнозирования надежности сложных металлических конструкций различного назначения;

проводится анализ поведения конструкций при длительной эксплуатации с использованием результатов инструментального обследования.

Численное моделирование поведения конструкций при решении задач диагностики и прогнозирования выполняется на основе конечномерной дискретной модели. К последней исходная граничная задача сводится при применении синтеза различных численных методов решения этой задачи: по времени эксплуатации конструкции — методом конечных разностей, по пространственной области конструкции — методом конечных элементов.

1. Радыш Ю. В., Киреев А. С. Совершенствование базы диагностики технического состояния и прогнозирования надежности резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов // Технич. диагностика и неразруш. контроль. — 2000. — № 4. — С. 38–47.
2. Справочное пособие по расчету машиностроительных конструкций на прочность / А. А. Лебедев, Б. И. Ковальчук, С. Э. Уманский и др. — Киев: Техника, 1990. — 240 с.
3. Радыш К. В., Радыш Ю. В., Киреев А. С. Термодинамика разрушения / Технич. комитет «Спецмонтаж». — Киев, 2001. — 31 с. — Машинопись. — Деп. в ГНТБ Украины 16.05.2001, № 71-Ук2001.
4. Седов Л. И. Механика сплошной среды. — М.: Наука, 1984. — Т. II. — 560 с.

Корпорация «Укрмонтажспецстрой», Технич. комитет «Спецмонтаж»,
Кiev

Поступила в редакцию
18.12.2001



УДК 621.120.19

КОНТРОЛЬ ГЕРМЕТИЧНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗДЕЛИЙ С МНОГОСЛОЙНОЙ СТЕНКОЙ.

2. ВЫБОР СПОСОБОВ КОНТРОЛЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ И СОЗДАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИХ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ю. Н. ПОСЫПАЙКО

Проведен анализ наиболее перспективных способов контроля герметичности сварных соединений многослойных изделий, предложены критерии их оценки. Описаны лабораторные стенды и оборудование для исследования способов контроля.

Analysis of the most promising methods of monitoring the tightness of welded joints in multi-layer products has been performed, and criteria for their evaluation are proposed. Laboratory facilities and equipment for studying the monitoring methods are described.

Разработка, изготовление и эксплуатация изделий с многослойной стенкой — аппаратов химических производств, трубопроводов, резервуаров и т. п. — вызваны растущими требованиями к повышению производительности, мощности, надежности и безопасности оборудования высокого давления [1–3]. Особенность технологического контроля таких изделий заключается в том, что необходимо проводить испытания на герметичность внутренних сварных соединений [4]. Это обусловлено возможностью возникновения в процессе сварки сквозных дефектов во внутренних сварных швах, что может привести к проникновению рабочего, хранящегося или транспортируемого вещества из полости изделия в полость межслойных зазоров многослойной стенки. Его накопление может стать причиной нарушения нормальной работы изделия или его разрушения.

В статье [5] проанализированы наиболее характерные сквозные дефекты сварных соединений изделий с многослойной стенкой и факторы, определяющие параметры межслойных зазоров. Приведены также методы расчета сближения двух контактирующих поверхностей в межслойном зазоре; описаны результаты моделирования, расчета и исследования газопереноса по межслойным зазорам. В данной статье рассмотрены вопросы анализа и выбора способов контроля герметичности сварных соединений, описаны лабораторные стенды и оборудование для их исследования.

Выбор способов контроля герметичности.

Процесс принятия решения о применении того или иного способа контроля герметичности конкретного изделия или сооружения, понимаемый как выбор одной из альтернатив, является наиболее важным в работе специалистов-разработчиков. Специалист, пользуясь своим опытом и интуицией, учитывая мировой опыт и полезные советы коллег, делает выбор на основе своей оценки ситуации под влиянием целого ряда факторов: новизны рассматриваемой проблемы; трудности получения полного списка альтернатив; многофункционального характера их оценок; трудности выявления всех критериев сравнения альтернатив; трудности сопоставления разнородных критериев; субъективного характера многих оценок альтернатив. Сложность

проблемы выбора нарастает с увеличением количества альтернатив и критериев их оценки.

Наиболее известный подход к решению таких сложных проблем получил название многофункционального анализа альтернатив [6–8]. Методы многофункционального анализа определяют четкую последовательность действий: анализ целей и средств; выделение и последовательное рассмотрение альтернативных вариантов решения проблемы; их сравнение по отдельным критериям; стремление к рациональному выбору альтернативы путем объединения оценок отдельных критериев в общую оценку ее полезности.

Таким образом, выбор способа контроля герметичности конкретного изделия или сооружения можно проводить не субъективно, а методом расчета. Для этого необходимо установить перечень альтернатив-способов, а также критериев их сравнения, определить оценки по отдельным критериям для каждой альтернативы и объединить эти оценки в общую оценку ее полезности. Если эти перечни разрабатывает один специалист, то он же и определяет, как оценить каждый критерий, т. е. строит шкалу оценки; если же несколько специалистов, то их оценки сводятся к единой, обычно средней. Переход к получению общей оценки альтернативы осуществляется, как правило, на основании формул, объединяющих оценки по отдельным критериям в общую оценку полезности альтернативы. Выбор той или иной формулы чаще всего определяет специалист. Расчет общих оценок альтернатив целесообразно выполнять на ЭВМ — исходными данными для него являются общий вид формулы и оценки альтернатив по критериям. Наиболее распространенные методы принятия решения при многих критериях, отличающиеся формулой перехода к единой оценке полезности альтернатив, проанализированы в [9, 10]. Нами выбраны два метода.

Метод взвешенной суммы предусматривает определение N критериев оценки альтернатив, назначение коэффициентов важности ω критериев и их нормирование:

$$\sum_{i=1}^N \omega_i = 1. \quad (1)$$



Полезность каждой из альтернатив определяется по формуле

$$U = \sum_{i=1}^N \omega_i x_i, \quad (2)$$

где x_i — оценка альтернативы по i -му критерию; ω_i — коэффициент важности (веса) i -го критерия.

Метод взвешенного произведения также предусматривает определение N критериев оценки альтернатив, назначение нормированных коэффициентов важности ω_i критериев, а полезность альтернативы определяется по формуле

$$U = \prod_{i=1}^N \beta_i^{\omega_i}, \quad (3)$$

где β_i — отношение фактической оценки i -го критерия x_i к наилучшему значению по i -му критерию y_i .

Таким образом, все учитываемые критерии, в том числе и экономические, выражают в относительных единицах:

$$\beta_i = x_i / y_i, \text{ если } x_i < y_i,$$

$$\beta_i = y_i / x_i, \text{ если } x_i > y_i.$$

Чем ближе оценка x_i к y_i , тем менее негативное влияние она оказывает на конечный результат.

Вне зависимости от достоинств и недостатков отдельных методов можно выделить некий общий положительный эффект, возникающий при применении многокритериального подхода к анализу альтернатив. Прежде всего несомненным достоинством является само разложение единого качества на совокупность его составляющих. Оценку по отдельным критериям определить гораздо легче. В случае, когда эти оценки вызывают сомнения, их легче проверить. Если несколько специалистов оценивают один критерий, то их мнения могут расходиться. Практика показывает, что при оценке альтернативы в целом расхождение будет значительно. При оценке же по отдельным критериям совпадений точек зрения специалистов гораздо больше. Это естественно, поскольку оценка по отдельному критерию не столь сложна и имеет гораздо более четкое смысловое содержание.

В результате анализа нами отобраны десять наиболее перспективных способов-альтернатив для контроля герметичности сварных соединений многослойных конструкций (на основе масс-спектроскопического, пузырькового и химического методов контроля):

I — с помощью щупа масс-спектрометрического течеискателя;

II — вакуумирования с применением масс-спектрометрического течеискателя;

III — с помощью щупа галогенного, электронно-захватного, плазменного, катарометрического или оптико-абсорбционного течеискателя;

IV — вакуумно-пузырьковой камеры с нанесением на шов пенообразующего раствора;

V — вакуумно-пузырьковой камеры, заполняемой жидкостью;

VI — опрессовки межслойных зазоров воздухом;

VII — комбинированный способ опрессовки и вакуумно-пузырьковой камеры;

VIII — опрессовки межслойных зазоров химически активным газом;

IX — предварительного внесения химически активного пробного материала в межслойные зазоры;

X — опрессовки полости водным раствором химически активного пробного материала.

Определим их основные критерии оценки.

1. *Порог чувствительности.* Характеризуется наименьшим потоком, регистрируемым как сигнал о течи. Порог чувствительности x_1 каждого из рассматриваемого способов должен удовлетворять требованиям к контролю герметичности и обладать по отношению к ним определенным «запасом» — чем больше этот «запас», тем ближе оценка к единице.

2. *Производительность контроля.* Определяется протяженностью сварных соединений или количеством изделий, проконтролированных за определенное время. Оценка x_2 является результатом сравнения производительности различных способов.

3. *Надежность контроля.* Характеризуется его способностью выполнять заданные функции, сохраняя свои показатели в установленных пределах в течение требуемого промежутка времени. Оценка является также результатом сравнения различных способов с точки зрения их надежности в условиях трубоэлектросварочного цеха.

Оценка альтернативных способов контроля герметичности многослойных конструкций (на примере многослойных труб)

№ п/п	Критерий оценки	Весовой коэф- фициент ω	Оценка x_i способов-альтернатив									
			I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
1	Порог чувствительности	0,20	0,9	1,0	0,8	0,9	0,9	0,7	0,9	0,8	0,8	0,7
2	Производительность	0,10	0,8	0,8	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,8
3	Надежность	0,10	0,5	0,5	0,6	0,8	0,8	0,9	0,8	0,7	0,5	0,5
4	Вероятность	0,15	0,8	0,8	0,5	0,5	1,0	0,8	1,0	0,8	0,5	0,5
5	Экономичность	0,05	0,7	0,6	0,8	0,8	0,7	1,0	0,8	0,8	0,6	0,7
6	Трудоемкость	0,10	1,0	0,8	0,9	0,8	0,8	1,0	0,8	0,9	0,7	0,8
7	Стоимость оборудования	0,05	0,5	0,5	0,7	0,8	0,7	1,0	0,7	0,8	0,5	0,5
8	Технологичность	0,10	0,9	0,5	0,8	0,8	0,8	0,9	0,8	0,6	0,8	0,8
9	Требования к персоналу	0,05	0,5	0,5	0,7	0,8	0,9	0,8	0,9	0,5	0,5	0,6
10	Механизация, автоматизация	0,10	1,0	1,0	1,0	0,7	0,7	0,6	0,6	0,5	0,5	0,8
<i>Рассчитанные значения функции полезности:</i>												
по формуле (2)			0,81	0,76	0,76	0,78	0,85	0,82	0,83	0,73	0,64	0,68
по формуле (3)			0,78	0,73	0,75	0,76	0,84	0,81	0,82	0,71	0,62	0,66

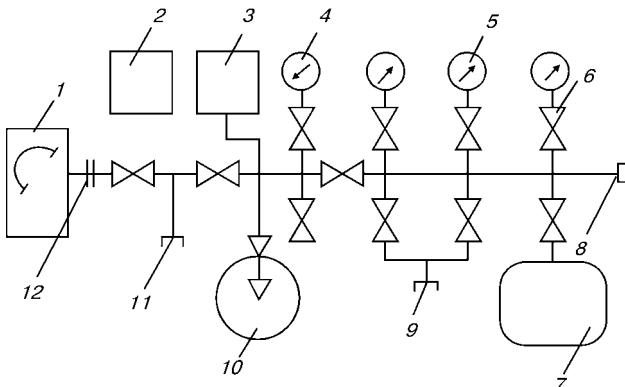


Рис. 1. Схема лабораторного стенда НК-129 для контроля герметичности: 1 — масс-спектрометрический течеискатель ПТИ-10; 2 — галогенный течеискатель ГТИ-6; 3 — вакуумметр электроразрядный магнитный ВЭМБ-1П; 4 — вакуумметр образцовий ВО; 5 — манометр образцовий МО; 6 — газовый вентиль; 7 — ресивер; 8 — фланцевый вход для подвода пробных газов; 9 — штуцерный выход для заполнения пробными газами изделий; 10 — вакуумный насос 2НВР-5ДМ; 11, 12 — штуцерный вход соответственно для вакуумирования изделий (или вспомогательного оборудования) и подключения течеискателя

4. Достоверность контроля. Определяется вероятностью соответствия результатов контроля действительным значениям контролируемых признаков. Оценка x_4 основывается на физической сущности способа и техническом уровне оборудования, его реализующем.

5. Экономичность контроля. Характеризуется его свойством обеспечивать минимальные затраты на контроль при установлении достоверности и других технических требованиях к нему. Оценка x_5 определяется на основании сравнения затрат на контроль изделия.

6. Трудоемкость контроля. Определяется трудозатратами на проведение процесса контроля одного изделия. Оценка x_6 устанавливается на основании сравнения трудозатрат на контроль изделия.

7. Стоимость оборудования и материалов для контроля изделия различными способами определяет оценку x_7 .

8. Технологичность контроля. Характеризуется удобством выполнения операций контроля конкретного изделия тем или иным способом с по-

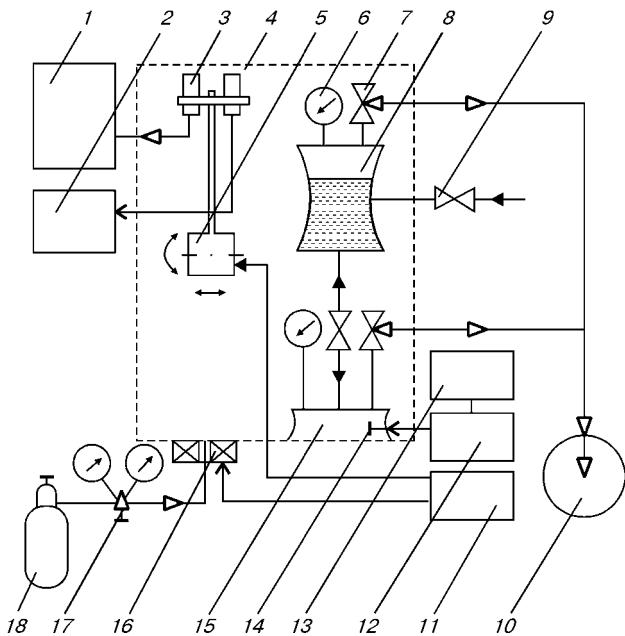


Рис. 3. Схема лабораторного стенда Об-2266: 1 — масс-спектрометрический течеискатель ПТИ-10; 2 — галогенный течеискатель ГТИ-6; 3 — датчики течеискателя; 4 — многослойная труба-образец; 5 — приспособление передвижения датчиков течеискателя вдоль швов; 6 — вакуумметр ОВВ1-100; 7 — трехходовой кран; 8 — бак для индикаторной жидкости; 9 — вентиль; 10 — вакуумный насос 2НВР-5Д; 11 — блок питания электромагнитного приспособления и управления передвижением датчиков течеискателя; 12 — блок ультразвуковой локации пузырьков; 13 — ультразвуковой дефектоскоп УД-11ПУ; 14 — ультразвуковой преобразователь; 15 — накладная вакуумная камера; 16 — электромагнитное приспособление заполнения межслойных зазоров пробным газом; 17 — редуктор давления; 18 — газовый баллон

мощью оборудования, реализующего этот способ. Оценка x_8 определяется в результате сравнения технологичности контроля изделия тем или иным способом.

9. Требования к персоналу, обслуживающему оборудование для контроля, определяет оценку x_9 . Причем, чем эти требования выше, тем оценка ниже.

10. Возможность механизации или автоматизации контрольных операций определяет оценку x_{10} . Оценка будет выше, если способ контроля поддается механизации или автоматизации.

В основу анализа альтернативных способов контроля герметичности многослойных конструкций положены функции полезности, определяемые выражениями (2), (3). Исходные данные и результат расчета приведены в таблице, в которой номер способа-альтернативы (I-X) соответствует номеру приведенного ранее перечня. Для каждого критерия оценки способов контроля директивно установлены весовые коэффициенты ω_i . Они являются общими для всех десяти сопоставляемых способов контроля.

Как видно из таблицы, наибольшие значения функции полезности имеют способы V (вакуумной камеры, заполняемой жидкостью), VII (комбинированный способ опрессовки и вакуумно-пузырьковой камеры) и VI (способ опрессовки межслойных зазоров воздухом). Далее следует группа га-

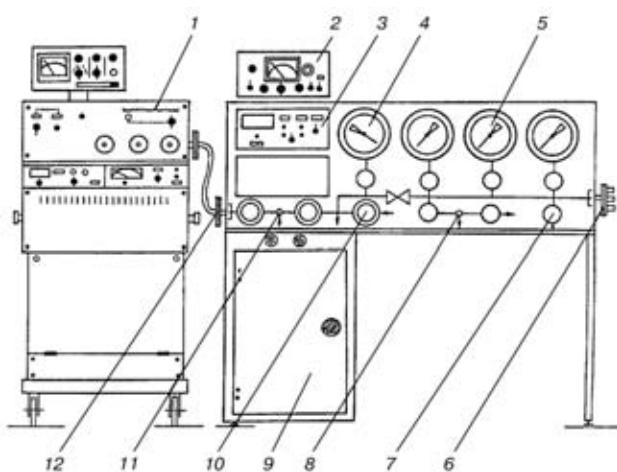


Рис. 2. Лабораторный стенд НК-129 для контроля герметичности (обозначения см. в тексте)

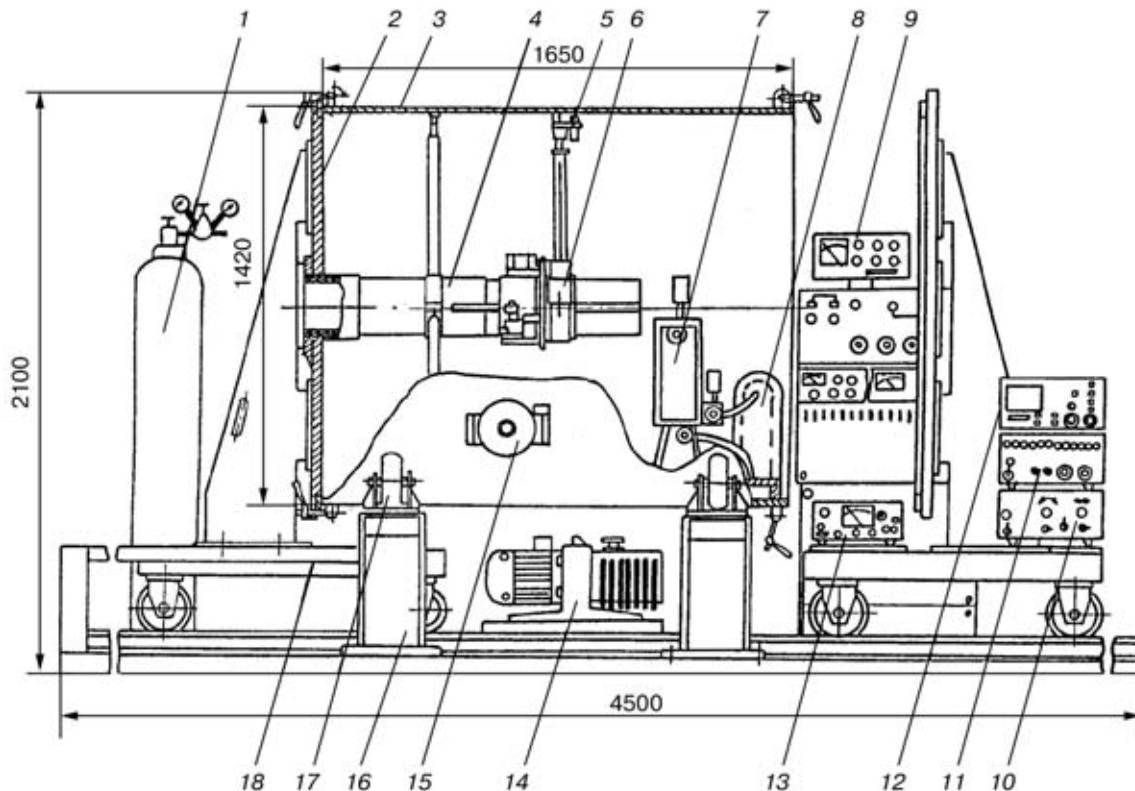


Рис. 4. Лабораторный стенд Об-2266 для испытания методов и средств контроля герметичности сварных соединений многослойных труб большого диаметра и других крупногабаритных изделий (обозначения см. в тексте)

зоаналитических способов. Ниже показатели у группы химических способов.

Создание лабораторных стендов для проведения исследований. Для проведения исследований различных методов и средств контроля герметичности многослойных изделий нами разработаны и изготовлены ряд лабораторных стендов и промышленное оборудование.

На рис. 1 показана схема стендаНК-129 для контроля герметичности изделий, который позволяет: заполнять изделия или их изолированные полости пробными газами давлением до 2,5 МПа; готовить смеси различных пробных газов в ресивере и заполнять ими изделия; создавать разрежение в изделиях или во вспомогательном оборудовании.

Конструктивно стенд НК-129 (рис. 2) представляет собой рабочий стол и панель управления с коммутирующими элементами, измерительными приборами, вакуумным насосом и ресивером. В состав стендадвключены гелиевый течеискатель ПТИ-10 1 и галогенный ГТИ-6 2. На панели управления стендадоступны: вакуумметры электроразрядный магнитный ВЭМБ-1П 3 и образцовый ВО ВТ-З 4 для измерения разрежения в диапазоне 1...1000 Па; три манометра образцовых МО 5 для измерения давления пробных газов в диапазоне 0,1...2,5 МПа; фланцевый вход 6 для подвода пробных газов; газовые вентили 7 и штуцерный выход 8 для заполнения пробными газами изделий; вакуумные вентили 10 ВРП2-25 и штуцерный вход 11 для вакуумирования изделий или вспомогательного оборудования; фланцевый выход

12 для подключения к стендуделиевого течеискателя ПТИ-10. В шкафу 9 размещены вакуумный насос 2 НВР-5Д и ресивер объемом 0,03 м³.

Стенд Об-2266 (рис. 3, 4) предназначен для исследований методов и средств контроля герметичности многослойных труб большого диаметра и других аналогичных крупногабаритных изделий. Совместно со стендом НК-129 он позволяет:

вакуумировать трубу или заполнять ее пробным газом до давления 0,5 МПа;

вакуумировать полость межслойных зазоров стенки трубы или заполнять ее пробным газом до давления 2,5 МПа;

перемещать преобразователи газоаналитических течеискателей вдоль кольцевых и продольных швов;

вакуумировать отдельные участки трубы с помощью накладных вакуумных камер и заполнять вакуумные камеры жидкостью;

выполнять ультразвуковую локацию пузырьков в жидкости.

Стенд Об-2266 (рис. 4) включает поворотный рольганг (16, 17) для размещения на нем многослойной трубы-образца 3 или другого аналогичного изделия и их вращения; люки-крышки 2 для уплотнения торцов трубы с целью создания в ней разрежения или повышенного давления, расположенные на подвижных тележках 18; узел 5 крепления преобразователей течеискателей и каретку 6 для их перемещения вдоль кольцевых и продольных швов, размещенные на несущей штанге 4; течеискатели — масс-спектрометрический ПТИ-10 9 и галогенный ГТИ-6 13; электромагнитное уст-

ройство 15 заполнения межслойных зазоров трубы пробным газом, соединенное напорным рукавом с редуктором газового баллона 1; блок питания 10 электромагнитного устройства 15; накладную вакуумную камеру 8 и устройство 7 заполнения камеры жидкостью и ее откачки, соединенные с вакуумным насосом 2НВР-5Д 14; аппаратуру 11, 12 ультразвуковой локации пузырьков в жидкостной камере. Схема электрических, вакуумных, пневматических и гидравлических соединений стенда Об-2266 показана на рис. 3.

Оба стенда позволяют изучать и испытывать различные известные способы и средства контроля герметичности многослойных изделий и разрабатывать новые. Кроме стендов, для выполнения испытаний были изготовлены специальные сварные образцы с естественными и искусственными сквозными дефектами, в которых пробный газ можно подавать со стороны корня шва.

Использовались также стены Об-981 и Об-1898 [11], разработанные и изготовленные в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины ранее, и промышленные установки Об-2101 и Об-2102 [12, 13] для контроля герметичности многослойных труб большого диаметра на Выксунском металлургическом заводе.

ВЫВОДЫ

- Выбор способа контроля герметичности конкретного изделия или сооружения можно свести к расчету на основе теории многокритериального анализа альтернатив. Для этого необходимо установить перечень альтернатив-способов и перечень критериев их сравнения, определить оценки по отдельным критериям для каждой альтернативы и объединить эти оценки в общую оценку полезности альтернативы.

- В результате анализа нами отобраны десять наиболее перспективных способов-альтернатив контроля герметичности сварных соединений многослойных конструкций на основе масс-спектроскопического, пузырькового и химического методов контроля.

- Каждый из этих способов-альтернатив оценивается по десяти основным критериям: порогу чувствительности, производительности, надежности, достоверности, экономичности, трудоемкости и технологичности контроля, стоимости оборудования и материалов для контроля, требованиям к персоналу, возможности механизации или автоматизации контрольных операций. Для каждого критерия директивно установлены весовые коэффици-

енты (общие для всех сопоставляемых способов контроля).

- Наилучшие расчетные показатели имеют следующие способы: вакуумно-пузырьковой камеры, заполняемой жидкостью; комбинированный способ опрессовки и вакуумно-пузырьковой камеры; опрессовки межслойных зазоров воздухом. Далее следует группа газоаналитических способов. Ниже показатели у группы химических способов.

- Для проведения исследований различных методов и средств контроля герметичности многослойных изделий в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины разработаны и изготовлены ряд лабораторных стендов и промышленное оборудование.

- Новиков В. И.* Многослойные сварные конструкции // Многослойные сварные конструкции и трубы. — Киев: Наук. думка, 1984. — С. 20–24.
- Макаров В. М.* Совершенствование рулонированных сосудов высокого давления // Там же. — С. 14–19.
- Патон Б. Е., Бицкий С. М.* Конструкция, технология и основные характеристики многослойных труб для магистральных газопроводов // Там же. — С. 5–14.
- Трушченко А. А., Посыпайко Ю. Н.* Особенности контроля герметичности сварных соединений многослойных труб // Передовой опыт неразрушающего контроля качества сварных соединений. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1979. — С. 134–136.
- Посыпайко Ю. Н.* Контроль герметичности сварных соединений изделий с многослойной стенкой. 1. Расчет и исследование газопереноса по межслойным зазорам // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2001. — № 2. — С. 20–26.
- Ларичев О. И.* Наука и искусство принятия решения. — М.: Наука, 1979. — 200 с.
- Ларичев О. И.* Объективные модели и субъективные решения. — М.: Наука, 1987. — 144 с.
- Кини Р. Л., Райфа Х.* Принятие решений при многих критериях предпочтения и замещения. — М.: Радио и связь, 1981.
- Троицкий В. А.* Количественная оценка уровня качества сварочных процессов и оборудования // Автомат. сварка. — 1983. — № 4. — С. 62–66.
- Троицкий В. А., Посыпайко Ю. Н.* Выбор способов контроля герметичности на основе теории экспериментального многокритериального анализа // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1996. — № 2. — С. 22–26.
- Трушченко А. А., Посыпайко Ю. Н., Кавуненко П. М.* Установки для контроля герметичности сварных соединений вакуумно-пузырьковым методом. — Киев, 1979. — 4 с. — (Информ. письмо № 3, ИЭС им. Е. О. Патона).
- Посыпайко Ю. Н., Трушченко А. А., Троицкий В. А.* Установки для механизированного контроля герметичности многослойных труб. — Киев, 1983. — 4 с. — (Информ. письмо № 35, ИЭС им. Е. О. Патона).
- Троицкий В. А., Посыпайко Ю. Н., Нагайцев В. А.* Механизированный контроль герметичности сварных соединений многослойных труб // Дефектоскопия. — 1988. — № 8. — С. 81–85.

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

Поступила в редакцию
05.03.2002



ОБ ОЦЕНКЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МАГНИТНЫМ МЕТОДОМ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И ИЗДЕЛИЙ

А. Ю. БОНДАРЕНКО

Рассмотрены проблемы прогнозирования остаточного ресурса сварных соединений особо ответственных конструкций. Показана на основе проведенных статических и усталостных испытаний, а также разработанной методики принципиальная возможность прогнозирования остаточного ресурса сварных конструкций магнитным методом по значению коэрцитивной силы.

The paper deals with the problems of forecasting the residual life of welded joints of super critical structures. The basic capability of forecasting the residual life of welded structures by the magnetic method by assigning a coercive force is shown on the basis of the conducted static and fatigue tests, as well as the developed procedure.

Прогнозирование индивидуального остаточного ресурса относится к конкретному, находящемуся в эксплуатации техническому объекту. Оно основывается на информации, которую условно можно разделить на три части [1].

1. Данные текущего (оперативного) контроля в процессе эксплуатации. Контроль может быть непрерывным или дискретным (например, приуроченным к плановым профилактическим мероприятиям). Для поиска дефектов используют встроенные и внешние приборы, системы для хранения и переработки диагностической информации, алгоритмы и программы для принятия решений [2].

2. Данные о нагрузках и других условиях взаимодействия объекта с окружающей средой [3] (рис. 1).

Диагностическая информация ограничена по объему и носит лишь косвенный характер. Применение средства контроля не позволяет в полной мере обнаружить структурные изменения, а также повреждения и трещины, которые в дальнейшем могут стать причиной предельных состояний. Вероятность такого пропуска вследствие несовершенства аппаратурь, небрежности оператора или недоступного расположения дефектов довольно велика.

Ценным дополнительным источником информации служат данные о режимах нагружения. По известной истории нагружения с использованием расчетных схем можно оценить степень накопления повреждений в конструкции, а сопоставляя результаты

расчета с диагностическими данными, — параметры объекта, которые на предыдущих стадиях еще не были идентифицированы с достаточной точностью.

Таким образом, все источники информации — диагностические данные о состоянии объекта, данные о старении материала и истории нагружения объекта — оказываются тесно связанными и взаимозависимыми.

3. Третьим видом информации для прогнозирования ресурса на стадии эксплуатации является весь объем априорных данных о материалах, элементах, узлах, нагрузках и пр., т. е. информация, которая лежит в основе прогнозирования ресурса и оценки показателей надежности на стадии проектирования.

Эта информация относится к генеральной совокупности объектов, в то время как предметом индивидуального прогнозирования служит вполне определенный представитель из этой совокупности. Однако информация об этом представителе остается неполной и неточной, а значительная ее часть имеет вероятностный характер. Например, если внешние воздействия имеют случайный характер, то их изменение на отрезке прогнозирования следует трактовать как случайный процесс. Применительно к металлу, применяемому в трубопроводах, впрочем, как и к материалу других конструкций, можно предложить классификацию, предусматривающую, как минимум, три группы состояния материала (рис. 2).

Следующая задача индивидуального прогнозирования — оценка риска по отношению к опасным аварийным ситуациям, установление предельно допустимых остаточных сроков эксплуатации при наличии возрастающего риска и выдача рекомендаций о мерах по повышению безопасности. Например, для находящихся в эксплуатации трубоп-

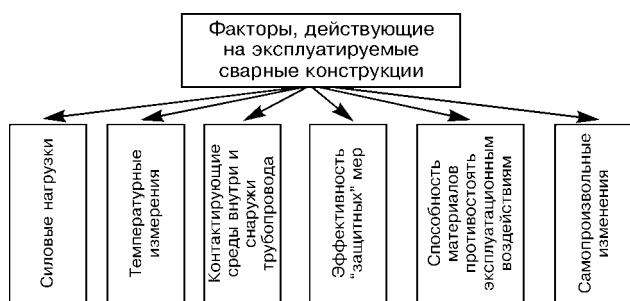


Рис. 1. Факторы, вызывающие старение сварных конструкций

© А. Ю. Бондаренко, 2002

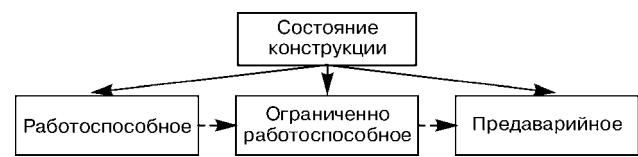


Рис. 2. Классификация состояний материала сварной конструкции



Рис. 3. Критерии, определяющие состояние металла сварной конструкции

роводов первостепенное значение приобретают параметры, которые могут изменяться под влиянием эксплуатационных воздействий и, следовательно, выступать в качестве критериев при определении того или иного состояния материала согласно классификации на рис. 3. Анализируемые параметры должны непосредственно либо косвенно характеризовать способность материалов выдерживать заданные нагрузки.

В реальной широкой практике оценка состояния строится преимущественно на информации о дефектности металла. При этом данные о его структурном состоянии по ряду причин не учитываются, хотя вполне очевиден целый класс объектов, где материаловедческие аспекты состояния металла являются преобладающими, так как дефекты, возникающие на почве структурной деградации, не успевают выявляться из-за их лавинообразного роста и практически мгновенного разрушения изделия.

Изменения свойств в процессе деформационного старения после длительной эксплуатации определяются не столько временем, сколько предварительной пластической деформацией [14]. При этом наибольшие деформации носят локальный характер, что дополнительно осложняет непосредственную оценку. Исключая из рассмотрения экстремальные случаи, связанные с грубыми нарушениями условий монтажа трубопроводов, подвижками грунта и т. п., целесообразно отметить следующее.

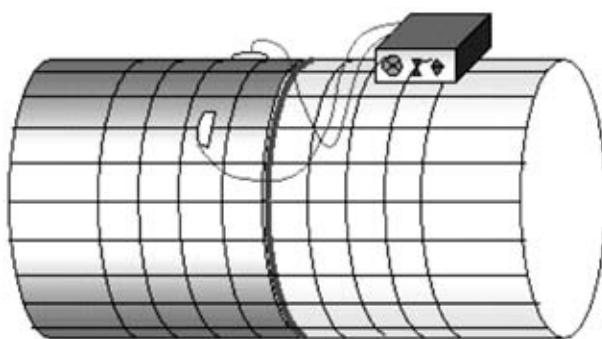


Рис. 4. Расположение датчика коэрцитиметра на образце сварной трубы магистрального трубопровода при исследовании параметров методики проведения мониторинга остаточного ресурса особенно ответственных сварных конструкций

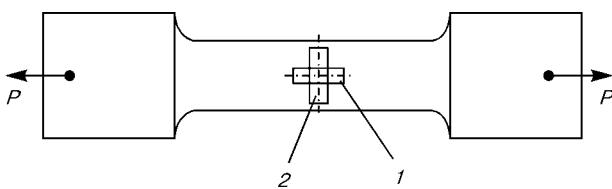


Рис. 5. Позиционирование (1 – продольное; 2 – поперечное) датчика коэрцитиметра при испытании образцов из трубной стали 09Г2С

1). В процессе производства трубный передел сопровождается холодным деформированием металла, что особенно характерно для сварных труб. Иными словами, нельзя полностью исключить возможность возникновения повышенных местных пластических деформаций, которые могут повлиять на дальнейшую эксплуатацию трубопроводов в полевых условиях.

2). Максимальные искажения формы поперечного сечения трубной заготовки наблюдаются на концевых участках (так называемый концевой эффект). Характерно, что значительное количество разрушений при испытаниях и эксплуатации трубопроводов зарождается именно в этих местах. Наименее контролируемы значения возможных пластических деформаций в монтажных условиях. Их допустимый уровень ограничивается правилами выполнения работ, таких, как холодное гнутье труб или выпрямление местных искажений формы.

3). В процессе эксплуатации пластические деформации, значения которых зависят от ряда факторов, могут возникать в зоне механических повреждений и коррозионных дефектов, в местах образования гофров и на других участках деформирования металла трубопровода [6].

С учетом сказанного выше были проведены исследования с целью разработки методики оценки изменений служебных характеристик трубных сталей в процессе эксплуатации для прогнозирования остаточного ресурса. Для контроля напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса материала данных сварных металлоконструкций использован магнитный метод [7–9]. Исследования проведены на образцах из трубной стали 09Г2С с использованием коэрцитиметра с приставным магнитным устройством (ПМУ).

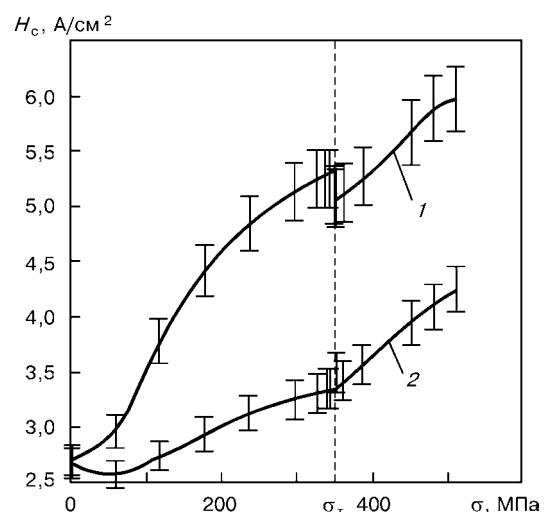


Рис. 6. Зависимость коэрцитивной силы H_c от напряжения σ при растяжении образцов из основного металла (стали 09Г2С): 1 – в направлении 90° ; 2 – 0°

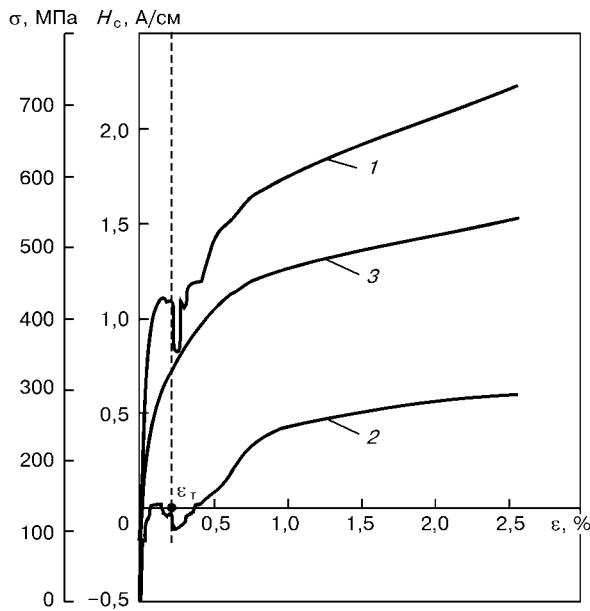


Рис. 7. Зависимость величины H_c (1, 2 – в направлении 90 и 0°) и прикладываемого напряжения σ (3) от поперечной деформации ϵ при растяжении сварных образцов из стали 09Г2С

Принцип выполнения исследования состоял в следующем: локальный участок контролируемого образца изделия (рис. 4) предварительно намагничивался с помощью ПМУ однополярными импульсами тока. Далее в катушку ПМУ подается размагничивающий ток (обратной полярности) и измеряется его значение I_0 в момент, когда индукция в магнитной цепи ПМУ – изделие, измеряя- мая преобразователем Холла (ПХ), равна нулю. Показания на измерительном устройстве прибора не зависят от изменения зазора между изделием и ПМУ в пределах от 0 до 0,7 мм. При этом погрешность измерения величины H_c в диапазоне 1...20 А/см составляет 5 %. Предварительно для получения значения величины H_c в абсолютных единицах проводили градуировку прибора на эталонных образцах с известными значениями этой величины с целью повышения достоверности измерений. Результаты измерений регистрировались и заносились в банк данных (блок памяти) прибора.

Одноосное статическое нагружение образцов стандартных размеров (700×60×28 мм) из трубной стали осуществляли на разрывной машине в соответствии с требованиями НД. Применение накладного датчика (ПМУ) позволило оперативно измерять значения H_c в различных направлениях по отношению к сварному соединению и направлению приложения нагрузки. При этом измерение коэрцитивной силы H_c образцов было проведено в процессе их поэтапного нагружения (рис. 5) в направлениях 0 (1) и 90° (2) по отношению к прикладываемой нагрузке P . Одновременно записывали диаграмму нагрузления и фиксировали начало пластического течения материала. Результаты исследований при одноосном растяжении образцов представлены на рис. 6. Кривые зависимости $H_c = f(\sigma)$ построены по средним из нескольких измерений значений коэрцитивной силы. Результаты иссле-

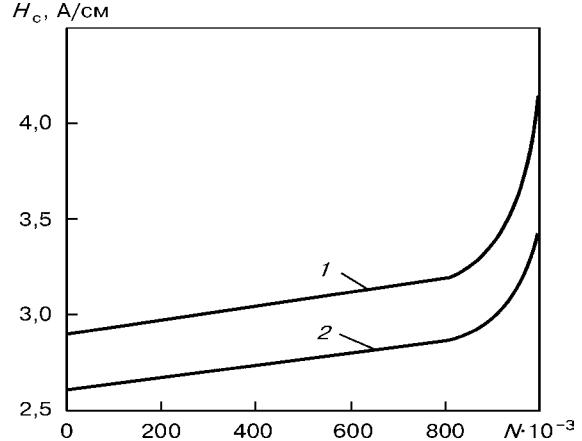


Рис. 8. Зависимость коэрцитивной силы H_c от количества циклов N для образцов из стали 09Г2С при многоцикловой усталости: 1 – в направлении 90°; 2 – 0°

дования при одноосном растяжении сварных образцов в соответствии с выбранной методикой представлены на рис. 7.

Анализ полученных результатов исследований показал, что в области упругих деформаций наибольшей чувствительностью к растягивающим напряжениям обладает способ, при котором коэрцитивная сила измеряется в направлении 90° (рис. 7, кривая 1). В направлении приложения нагрузки 0° для всех образцов наблюдается минимум функции $H_c(\sigma)$ (рис. 7, кривая 2). При этом было отмечено, что увеличение напряжения σ в зоне временного упрочнения металла приводит к росту H_c по обоим направлениям. Скачок значений величины H_c , наблюдаемый на кривых рис. 6, 7, соответствует состоянию текучести металла образца, представленной на диаграмме растяжения, т. е. достижению предела текучести σ_t в стали конструкции.

Моделирование процесса накопления повреждений и пластической деформации материала изделия при циклическом нагружении проводили на аналогичных образцах из стали 09Г2С. Испытания проводили в режиме многоцикловой усталости при отнулевом цикле нагружения с частотой 5 Гц и амплитудой нагружения 280 МПа. Характерная зависимость коэрцитивной силы H_c от количества циклов N при усталостном нагружении представлена на рис. 8.

Таким образом, была выявлена зависимость значений коэрцитивной силы при статическом и циклическом нагружении от параметров нагружения образцов сварных соединений из стали, применяемых для производства труб магистральных нефтегазопроводов [10]. При этом были определены пороговые значения H_c для зоны сварного шва (рис. 7), а также области основного металла, по достижении которых в металле начинают накапливаться необратимые изменения (рис. 6). Это дает основания, необходимые для прогнозирования эксплуатационного ресурса сварных конструкций с позиций анализа структурного состояния, а в комплексе с данными диагностики неразрушающего контроля существенно улучшает качество и досто-



верность оценки состояния и остаточного ресурса трубопроводов.

ВЫВОДЫ

1. Стендовые разрушающие статические и циклические исследования образцов сталей, проведенные в сочетании с параллельным коэрцитиметрическим контролем, подтвердили эффективность разработанной методики. Информационный параметр — коэрцитивная сила — в процессе «продвижения» металла от исходного состояния поставки до момента разрушения изменяется на 100...200 % в зависимости от особенностей ее состояния. Были установлены характерные значения величины H_c при нагрузках, соответствующих пределам текучести и прочности.

2. Для достоверного определения остаточного ресурса конструкции необходимы три источника информации: диагностические данные о состоянии объекта; данные о старении материала, полученные магнитным методом, а также истории нагружения объекта. При этом базовой основой для прогнозирования должна являться информация по каждому конкретному техническому объекту, полученная магнитным методом.

3. Используя рассмотренный подход и построив предварительно аналогичные зависимости для других марок сталей, использующихся при изготовлении несущих металлоконструкций, можно прогнозировать их остаточный ресурс непосредственно по результатам контроля магнитным методом значений коэрцитивной силы. Это позволяет рекомендовать данный метод как дополнительный к применяемым по обнаружению макродефектов для принятия решения об остаточном ресурсе и обеспечения качества эксплуатации ответственных сварных конструкций.

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

Поступила в редакцию
22.01.2002

Научно-производственная фирма Специальные Научные Разработки

СНР

Направления деятельности — разработка, изготовление приборов и установок НК механических свойств, структуры, напряженно-деформированного (усталостного) состояния, ресурса металлопродукции и оборудования по магнитным характеристикам металла: коэрцитиметры, аустенометры, многопараметрические анализаторы петли магнитного гистерезиса. Магнитометры универсальные и специализированные (для МПД), включая дефектоскопические. Приборы и установки УЗ-толщинометрии и дефектоскопии, работающие ЭМА-методом бесконтактно, по горячему металлу, без зачистки и без контактной жидкости (через слой защитного покрытия или воздушный зазор).

Методики применения всех этих средств НК.

Область применения — производство прокатной металлопродукции и оборудования машиностроения, текущее состояние оборудования, сосудов давления и др. металлоконструкций в эксплуатации, их диагностика, включая экспертизу технадзора.

Многоканальные системы технологической сигнализации, сбора, обработки и хранения информации для таких объектов, как энергетические котлы, турбины, генераторы, грузоподъемные машины общего и специального назначения.

г. Харьков, тел./факс (0572) 64-36-13, тел. 64-99-85, 26-32-06
E-mail: bezlyudko@yahoo.com

1. Болотин В. В. Ресурс машин и конструкций. — М.: Машиностроение, 1990. — 448 с.
2. Бондаренко А. Ю. Прогнозирование ресурса ответственных сварных конструкций на стадии эксплуатации // Тез. Междунар. конф. «Сварные конструкции» (Киев, окт. 2000 г.). — Киев, 2000. — С. 71.
3. О старении и оценке состояния металла эксплуатируемых магистральных трубопроводов / Б. Е. Патон, С. Е. Семенов, А. А. Рыбаков и др. // Автомат. сварка. — 2000. — № 7. — С. 3–12.
4. Стеклов О. И. Мониторинг и прогноз ресурса сварных конструкций с учетом их старения и коррозии // Сварка и родственные технологии — в XXI век: Сб. тр. междунар. конф. (ноябрь, 1998 г., Киев). — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1998. — С. 257–261.
5. В. С. Гиренко, С. Е. Семенов, Л. В. Гончаренко. Деформационное старение трубных сталей // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2001. — № 3. — С. 32–35.
6. Иванцов О. М. Надежность и экологическая безопасность магистральных трубопроводов России // Сб. тр. Междунар. конф. (Киев, ноябрь 1998 г.). — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1998. — С. 99–109.
7. Клюев В. В. Неразрушающий контроль и диагностика безопасности // Зав. лаборатория. Диагностика материалов. — 1996. — № 1. — С. 16.
8. Boving, Knud G. NDE handbook. NDT examination methods for condition monitoring. Teknisk Forland A/S. — Danish Technical Press, 1989. — 418 p.
9. Об оценке усталостного состояния и остаточного ресурса сварных соединений неразрушающим магнитным методом для обеспечения качества сварных конструкций и изделий / Л. М. Лобанов, Ю. К. Бондаренко, Г. Я. Безлюдко, А. Ю. Бондаренко // МИС. Док. V-2002–2001.
10. Об оценке усталостного состояния и остаточного ресурса сварных соединений неразрушающим магнитным методом. Материаловедческие аспекты / В. Ф. Мужицкий, Ю. К. Бондаренко, А. Ю. Бондаренко, Г. Я. Безлюдко // Матер. 3-й Междунар. конф. «Диагностика трубопроводов» (Москва, 21–26 мая 2001 г.). — С. 11.



АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАЗРУШАЮЩИХ АТМОСФЕРНЫХ НАГРУЗОК НА ЭЛЕМЕНТЫ КОНСТРУКЦИЙ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

А. А. КОЗЛОВСКИЙ, А. Е. ОРЛОВИЧ, С. В. СЕРЕБРЕННИКОВ

Рассмотрены причины и механизмы разрушения элементов конструкций линий электропередач; установлено, что 85 % всех разрушений происходит при их сверхнормативном обледенении. Предложена система прогнозирования разрушающей гололедной нагрузки, основанная на периодическом принудительном охлаждении контролируемой поверхности и линейной экстраполяции результатов измерения времени работы микрохолодильника. Разработано устройство, позволяющее своевременно вводить в действие специализированные средства защиты.

Causes for and mechanisms of fracture of structural elements in electric-power transmission lines are considered; it is found that 85 % of all the fractures occur at their abnormal icing. Proposed is a system of forecasting the breaking icing load, based on a periodical forced cooling of the surface being controlled and linear extrapolation of the results of measurement of the microcooler operation time. A device is developed, permitting a timely commissioning of specialized protective means.

Воздушные линии электропередач (ВЛЭ) являются звеном энергосистемы, наиболее подверженным разрушающему влиянию атмосферных нагрузок — гололеда, ветра, температуры и т. п. Большинство ВЛЭ Украины находится в эксплуатации 20–30 лет и уже исчерпало свой ресурс в среднем на 70 %. Это объясняется тем, что продолжительное воздействие нагрузок даже расчетных значений приводит к возрастанию усталости металла, накоплению повреждений и развитию дефектов в элементах конструкций. Старением металла объясняются увеличение с течением времени провисания электропроводов вследствие постоянных растягивающих усилий и обрывы провода в местах крепления к опорам. При сверхнормативном провисании фазных электропроводов и раскачивании под воздействием ветра возникают их схлестывания и, как результат, пережоги и надломы в местах контактирования. В свою очередь, механическая прочность опор снижается коррозионным износом металла под влиянием минерализованной влаги и грунтовых солей. Агрессивная среда также разъедает бетон опоры, вследствие чего он теряет прочность и выкрашивается; в местах контакта с окисленной арматурой бетон набухает и образуются сквозные трещины. Дополнительные нагрузки вследствие атмосферных воздействий также приводят к накоплению остаточных деформаций и ускоряют износ конструкций. Анализ причин отказов ВЛЭ по элементам показывает, что 30...35 % из них составляют повреждения опор, а в остальном — электропроводов и изоляторов, причем 85 % разрушений ВЛЭ происходит при сверхнормативном гололеде. Для учета экстремальных усилий, которые выдерживает конструкция под воздействием атмосферных факторов, в расчеты закладывается коэффициент запаса прочности 2,22...2,86. Дальнейшее усиление механической прочности является проблематичным и нецелесообразным, поскольку всегда существует вероятность того, что возникнет такая гололедно-ветровая нагрузка, которая приведет к полному разрушению ВЛЭ.

Из приведенного следует, что линии электропередачи в процессе эксплуатации естественным образом постепенно теряют свои прочностные характеристики. Но поскольку этим процессом возможно управлять, он не заканчивается разрушением ВЛЭ. Поэтому одной из основных задач технической эксплуатации линий является контроль за процессом изменения технических характеристик и диагностика состояния их элементов для принятия решений относительно проведения ремонтных работ по восстановлению характеристик или замене изношенных дефектных элементов новыми.

В то же время, как показывает ежегодный опыт, к наиболее массовым повреждениям элементов конструкций ВЛЭ приводит неуправляемое вероятностное влияние атмосферных нагрузок, которые превышают расчетные в 3–4 раза. Например, гололед 28–30 ноября 2000 г. привел к обесточиванию в 11 областях Украины 3861 населенных пунктов вследствие повреждения 15800 ВЛЭ; лишь в Винницкой области было разрушено 95 %, а в Одесской — 90 % опор распределительных сетей. Общие убытки от этих разрушений составили 512 млн грн. Такие результаты обусловлены тем, что действие асимметричных атмосферных нагрузок, в отличие от нормативных, создает изгибающие усилия на опоры, интенсивно закручивающие и растягивающие провода, а также другие деформирующие влияния. Например, при одностороннем отложении льда механическая нагрузка вызывает закручивание провода вокруг своей оси на угол 180° и более, что приводит к надломам и истиранию провода. Обледенелый провод приобретает повышенную пассивность и, соответственно, на него усиливается давление ветра: при углах направления последнего к ВЛЭ порядка 60...90° эта нагрузка передается опорам и приводит к их разрушению. При обрыве обмерших проводов с одного стороны опоры резко возрастают изгибающая нагрузка с другой, в результате чего опора падает, асимметрия нагрузки переносится на соседнее звено ВЛЭ и т. д. — наблюдается эффект опрокидывания опор по принципу «домино». Таким образом, применение лишь неразрушающего контроля за состоянием ВЛЭ явно недостаточно для предотвращения разрушаю-



щих спонтанных атмосферных нагрузок, поскольку для этого нужны надежные системы прогнозирования времени их появления. Лишь наличие своевременного прогноза позволяет успешно подготовить и эффективно применить соответствующие средства защиты. В настоящее время существуют электростатический, тепловой, физико-химический и механический способы защиты элементов конструкций электросетей от обмерзания. Наиболее рациональным и доступным является электростатический способ, при котором к действующей сети переменного тока подключается напряжение постоянного тока. При этом сложное результирующее электрическое поле напряженностью $E = 10 \dots 15 \text{ кВ/см}$ образует вокруг электропроводов ионную «рубашку» [1]. В результате масса гололедных отложений уменьшается на 50..80 %, а их плотность составляет $0,14 \dots 0,20 \text{ г/см}^3$ в отличие от обычной $0,86 \text{ г/см}^3$ при $E = 5 \text{ кВ/см}$. Эффективность такой защиты особенно высока на начальной стадии обмерзания. В случае, если масса гололеда на конструктивных элементах приближается к критическому значению, целесообразно применять экстренную его плавку токами искусственного короткого замыкания.

Таким образом, решение задачи предотвращения разрушающего гололедообразования состоит из двух этапов: 1) своевременной диагностики предгололедного состояния и прогноза времени до появления обмерзания элементов конструкций ВЛЭ; 2) применения активных методов предотвращения или устранения гололеда.

Для контроля за процессом образования гололедных отложений широко используются весовые датчики, которые ступенчато или плавно фиксируют гололедно-ветровые нагрузки. Сигнал от датчика поступает на диспетчерский пункт или же, при достижении критического значения, действует непосредственно на включение аппаратов защиты. Однако успешность этих мероприятий всецело зависит от скорости их проведения, т. е. от уменьшения суммарного времени: $\tau_{\text{пр}} = \tau_{\text{реш}} + \tau_{\text{соб}} + \tau_{\text{пл}} + \tau_{\text{k}} + \tau_{\text{разб}}$, ч, где $\tau_{\text{реш}}$ — интервал времени от сигнала о начале гололедообразования до принятия решения относительно защиты ВЛЭ; $\tau_{\text{соб}}$ — продолжительность сборки и настройки схемы защиты; $\tau_{\text{пл}}$, τ_{k} , $\tau_{\text{разб}}$ — соответственно время работы защитной аппаратуры, контроля эффективности защиты, разборки схемы и переподготовка ее для других присоединений подстанции.

Недостатком известных систем защиты является необходимость одновременно с диагностикой степени обмерзания проводить контроль за метеорологической ситуацией в районе электрических сетей. Опыт эксплуатации этих систем показал, что прогноз о возможности обмерзания носил весьма приближенный характер и был мало эффективен вследствие невозможности учета всей совокупности метеофакторов и, главное, — параметров непосредственно поверхности элементов ВЛЭ. Поэтому нами было предложено решение задачи заблаговременного (за 2–3 ч) прогнозирования начала обмерзания без применения длительных и трудоем-

ких метеоизмерений. При этом для нашего случая использована «малая динамическая модель прогноза гололеда» [2], из которой вытекает, что кристаллизация воды, т. е. образование гололеда и изморози, наблюдается в тех случаях, когда:

$$\Delta T = T_{\text{пр}} - T_{\text{л}} \leq 0. \quad (1)$$

Из этого следует, что провод ВЛЭ начнет обмерзать, если температура его поверхности $T_{\text{пр}}$ станет ниже, чем температура точки льда $T_{\text{л}}$, т. е. прогнозирование гололеда сводится к прогнозированию разности температур ΔT .

Основным недостатком приведенного метода является то, что он становится непригодным в случае гололедообразования при положительной температуре. В разработанной нами динамической модели прогнозирования диагностика момента обмерзания конструкций осуществляется на основе контроля времени τ_o изменения состояния контролируемой поверхности при искусственном ее охлаждении. Предложенная модель базируется на следующем: при температуре воздуха, при которой возможно обмерзание ($-8 < T_{\text{n}} < 2, ^\circ\text{C}$) одновременно запускаются электронный секундомер и устройство, охлаждающее контролируемый участок провода с постоянной скоростью. Момент появления искусственных гололедных отложений регистрируется датчиком, в частности, оптическим, сигнал с которого останавливает секундомер, фиксируя время τ_o работы охлаждающего устройства. В дальнейшем через определенные одинаковые промежутки времени Δt , достаточные для восстановления начального естественного состояния поверхности реального провода ВЛЭ ($\Delta t > \tau_o$), операция искусственного охлаждения повторяется. По мере приближения метеорологической ситуации к благоприятной для обмерзания время τ_{oi} будет уменьшаться, а в момент образования естественного гололеда $\tau_{oi} = 0$.

Время работы охлаждающего устройства, за которое появится гололед, может быть определено аналитически из уравнения теплового баланса для участка провода ВЛЭ:

$$P_x \tau_o = dQ_k + dQ_{\text{кр}} - dQ_d - dQ_{\text{ты}} - Q_{\text{л}}, \quad (2)$$

где P_x — мощность микрохолодильника; τ_o — время охлаждения; dQ_k — потери тепловой энергии вследствие конвективного теплообмена между проводом и окружающей средой; dQ_d — количество тепла, которое забирается водными каплями; $dQ_{\text{ды}}$ — количество тепла, выделяемое в проводе вследствие протекания электрического тока; $dQ_{\text{ты}}$ — теплоемкость рассматриваемого участка провода; $Q_{\text{л}}$ — скрытая теплота, освобожденная в момент покрытия поверхности провода льдом:

$$Q_{\text{л}} = m_{\text{л}} L_{\text{л}} \Delta \tau_{\text{л}}, \quad (3)$$

где $m_{\text{л}}$ — скорость гололедообразования; $L_{\text{л}}$ — удельная теплота плавления льда; $\Delta \tau_{\text{л}}$ — время срабатывания датчика льда.

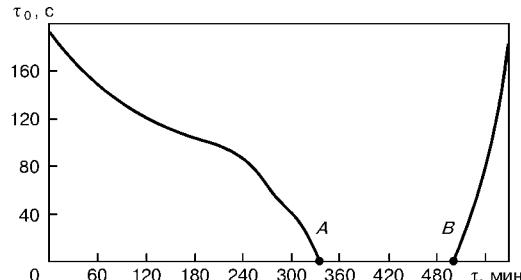


Рис. 1. Экспериментальная кривая изменения времени работы τ_0 охлаждающего устройства участка провода АС-50 ВЛЭ

Момент появления гололеда массой $M_{\text{л}}$ определяется выполнением условия, полученного из формул (2), (3):

$$M_{\text{л}} = \frac{dQ_{\text{k}} + dQ_{\text{kp}} - dQ_{\text{д}} - dQ_{\text{ty}} - P_x \tau_0}{L_{\text{л}}} > 0. \quad (4)$$

Изменяя по формуле (4) время τ_0 с определенным шагом, фиксируют его значение, при котором $M_{\text{л}} > 0$.

На рис. 1 приведена экспериментальная кривая изменения времени работы τ_0 охлаждающего устройства контролируемого участка провода АС-50 ВЛЭ напряжением 10 кВ от текущего времени τ при $T_n = 2^{\circ}\text{C}$. Характерная точка A отвечает началу процесса гололедообразования. Измерение времени τ_0 происходило с интервалом $\Delta\tau = 30$ мин. Видно, что значения τ_0 уменьшались при усилении гололедной ситуации и в точке A ($\tau_1 = 334$ мин) началось естественное обмерзание проводов ($\tau_0 = 0$), которое длилось от τ_1 до $\tau_2 = 498$ мин, после чего наступило разрушение гололеда (значения τ_0 возрастают от точки B). Анализ кривых $\tau_0 = f(\tau)$ показывает, что за интервал времени до 2 ч участки кривых в зоне, предшествующей обмерзанию, с достаточной для практики точностью могут быть аппроксимированы линейной функцией. Тогда время начала образования ледяных отложений рассчитывается по формуле

$$\tau_{\text{пп}} = \frac{\Delta\tau}{\tau_{oi-1}/\tau_{oi} - 1},$$

где τ_{oi-1} , τ_{oi} — время работы охлаждающего устройства, соответственно, на $i-1$ -м и i -м промежутках измерения, определяется из неравенства (4) либо экспериментально из рис. 1.

На рис. 2 показана структурная схема устройства автоматического прогнозирования и диагностики момента обмерзания. При температуре воздуха, характерной для гололедообразования, блок датчика температуры 5 подает управляющий сигнал на реле 6, которое подключает к блоку питания 9 секундомер 7 и охлаждающее устройство 1. Практически последнее реализуется на основе полупроводниковых термопар (пластин Пельтье), объеди-

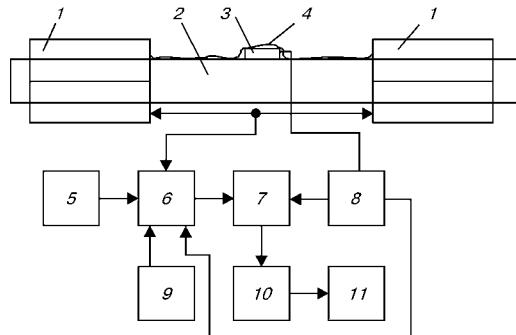


Рис. 2. Структурная схема устройства автоматического прогнозирования и диагностики момента обмерзания

ненных в термобатареи. На поверхности провода 2 расположен датчик 3 гололеда. При появлении искусственного гололеда 4 управляющий сигнал с датчика 3 подается на реле 8, которое отключает питание микроЭВМ 10. Далее через определенный промежуток времени при условии усиления гололедной ситуации процесс диагностики повторяется, а значение времени обмерзания корректируется и выводится на монитор 11. Устройства контроля (блоки 1–9) расположены на участках ВЛЭ с частотой 1 комплект на 20 км, а блоки 10, 11 — на центральном диспетчерском пункте. Информация о результатах опроса устройств контроля в энергосистеме передается диспетчеру с помощью высокочастотных телемеханических каналов связи [3]. Алгоритм обработки информации [4] обеспечивает расчет и при необходимости — текущую коррекцию времени гололедообразования, а также диагностику достижения нормального состояния ВЛЭ после проведения защитных мероприятий.

Таким образом, предложенная система прогнозирования времени гололедных нагрузок позволяет своевременно предотвращать или устранять их разрушающее воздействие.

- Гончар М. И., Белащ И. П. Защита проводов ВЛ вот гололедизморозевых отложений // Энергетика и электрификация. — 1995. — № 4. — С. 26–28.
- Колмогорова И. М., Цыбикдоржиев М. Ц., Винаров А. З. Разработка малой динамической модели прогноза гололеда // Рациональное проектирование и эксплуатация устройств сельского электроснабжения: Сб. науч. тр. — МИИСП, 1989. — С. 55–59.
- Котиш И. А., Орлович А. Ю., Серебреніков С. В. Автоматизоване системе контролю за станом ізоляції в повітряних мережах напругою 10–35 кВ // Техн. диагностика и не разруш. контроль. — 2000. — № 4. — С. 62–64.
- Пристрій для діагностики обмерзання електродротів повітряних ліній / О. А. Козловський, А. Ю. Орлович, С. В. Серебреніков, П. Г. Плещков // Фізичні методи та засоби контролю середовища, матеріалів та виробів: Зб. наук. праць. — Київ; Львів. — 2002. — Вип. 7.

О НЕОБХОДИМОСТИ ВНЕСЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ В ДОКУМЕНТЫ, УСТАНАВЛИВАЮЩИЕ ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ

И. Б. КОЛБИН, В. Н. ГОРБЕНКО, М. М. ТОПЧИЙ

Показано, что часть рекомендаций РТМ-1С-89, ВСН 012-88, ГОСТ 14782-86 по проведению ультразвукового контроля сварных шов невозможно выполнить, а выполнение некоторых других приводит к значительным погрешностям при изменении эквивалентных размеров дефектов и ухудшает воспроизводимость получаемых результатов. Необходимо откорректировать названные документы - это позволит облегчить работу с ними и повысит качество проводимого контроля.

It is shown that part of RTM-1S-89, VSN 012-88, GOST 14782-86 recommendations for UT of welds cannot be implemented, while following some of the others results in considerable errors when the equivalent defect sizes are changed, and affects the obtained result reproducibility. The above documents need to be corrected, which will make working with them easier and will improve the quality of performed control.

До настоящего времени в Украине остается не решенной проблема, связанная с отсутствием современной нормативно-технической документации (НТД) в области неразрушающего контроля (НК). Это в первую очередь относится к документам по ультразвуковому контролю (УЗК) продукции и производственных объектов в различных отраслях. Те документы, которые остались «по наследству» от бывшего СССР, как правило, были выпущены 15...20 и более лет назад, поэтому их требования очень сложно, а часто и невозможно распространить на эксплуатируемые сейчас современные приборы и оснастку. Кроме того, возникают ситуации, когда требования и нормы, содержащиеся в одних действующих документах, вступают в противоречие с аналогичными требованиями документов, выпущенных позже. В первую очередь это относится к документации, введенной в действие на рубеже 1980–1990 гг.

1. О внесении изменений в РТМ-1С-89 (РД 34.15.027-89). Ультразвуковой контроль сварных соединений оборудования тепловых электростанций выполняют по технологии, изложенной в ОП № 501 ЦД-75 [1]. Согласно требованиям этого документа чувствительность при контроле сварных швов толщиной от 3,5 до 20 мм настраивают, применяя искусственные угловые отражатели — «зарубки» определенного размера, зависящего от толщины соединяемых деталей. Эти размеры соответствуют нормам оценки качества, которые приведены в табл. 16.7 РТМ-1С-81 [2].

Согласно РТМ-1С-89 [3], которые введены в действие вместо [2], контроль сварных соединений трубных систем и трубопроводов должен выполняться по ГОСТ 14782-86 [4] и рекомендациям отраслевых НТД. В теплоэнергетике до настоящего времени таким документом остается [1]. Если значения предельно допустимых несплошностей, приведенных в ч. 1 табл. 16.6 [3], сравнить с соответствующими значениями из таблицы приложения 8 [1], то можно зафиксировать их значительные расхождения. Для сопоставления этих расхождений сравним нормы чувствительности контроля сварных соединений толщиной 15 мм: по требованиям

[1] чувствительность настраивают по «зарубке» площадью $S_3 = 7 \text{ mm}^2$, а согласно требованиям [3] максимально допустимая площадь дефекта соответствует площади плоскодонного отражателя $S_{\text{пп}} = 7 \text{ mm}^2$. В соответствии с рекомендациями [4] определим площадь $S_{\text{пп}}$, эквивалентную площади S_3 : $S_{\text{пп}} = KS_3$, где $K = 0,5$ (см. график приложения 5 документа [4] и рекомендации по выбору угла призмы для контроля швов толщиной 15 мм в таблице приложения 8 [1]). После подстановки значений получим $S_{\text{пп}} = 3,5 \text{ mm}^2$. Следовательно, предельная чувствительность контроля, устанавливаемая согласно требованиям [1], равна $3,5 \text{ mm}^2$, и она в 2 раза отличается от чувствительности, устанавливаемой по рекомендациям из ч. 1 табл. 16.6 [3]. Браковые уровни чувствительности, принимаемые по рекомендациям [1] и [3], будут отличаться на величину $\Delta N = 20 \lg (S_{\text{пп}}/S_{\text{пп}}) = 20 \lg (3,5/7) = -6 \text{ dB}$ (рекомендации для ее расчета взяты из раздела 4.4.2 ПНАЭ Г-7-030-91 [5]). Такие значительные отличия в требованиях [1], [3] существуют для диапазона толщины сварных соединений от 10 до 20 мм.

Для устранения несоответствия между этими документами предлагаем применить в [3] нормы оценки качества, которые содержатся в РТМ-1С-93 (см. табл. 16.10) [6]. Эти нормы совпадают с содержащимися в [1].

2. О необходимости изменения в документе ВСН 012-88 раздела «Ультразвуковой контроль». Еще одним документом, в котором раздел, регламентирующий проведение УЗК, требует тщательного рассмотрения и корректировки, является введенный в 1989 г. ВСН 012-88 [7]. По нему необходимо отметить следующее:

- 1). В п. 5.76 для контроля сварных соединений толщиной до 6 мм рекомендовано применять только разделено-совмещенные наклонные преобразователи (РСНП) с углом призмы 55°_2 . Такие же рекомендации даны и для других диапазонов толщины, но с тем отличием, что в качестве альтернативного варианта разрешено применение наклонных совмещенных преобразователей (НСП). В ВСН 012-88 не сказано, какой из двух известных основных типов



РСНП следует использовать: хордовый или угловой. А технология проведения контроля каждым из них имеет ряд специфических особенностей, которые вместе с указанием типа преобразователя было бы просто необходимо отобразить в документе. Кроме того, в [7] не приведено фокусное расстояние у рекомендованных РСНП. Из приведенного выше можно сделать единственный вывод — применение этих преобразователей в данном случае невозможно из-за отсутствия необходимого объема информации об их характеристиках и технологии контроля.

2). В п. 5.77 рекомендовано точку выхода луча, а также углы призмы и ввода у наклонных совмещенных преобразователей с не притертоей рабочей поверхностью проверять с использованием набора стандартных образцов (СО): СО-1, -2, -3 (это соответствует рекомендациям [4]). А в п. 5.78 сказано, что: «... проверку нестандартных (в т. ч. и РС) преобразователей, а также преобразователей с притертоей рабочей поверхностью следует проводить на стандартном образце предприятия (СОП), изображенном на рис. 13». На этом рисунке приведены изображения образцов с цилиндрической поверхностью для ввода УЗ колебаний и расположенными на различных поверхностях отражателями: угловыми цилиндрическими, плоскодонными и «зарубками». Ничего не сказано о том, какие параметры необходимо проверять. Очевидно, что авторы не предполагали проводить измерение специфических параметров преобразователей. Вероятнее всего, они имели в виду только наиболее важные, которые влияют на качество и достоверность контроля, как это сказано в [4]. Нам не известны методики, которые позволяют определить точку выхода луча, а также углы призмы и ввода с использованием СОП, изображенных на упомянутом выше рисунке. Если авторы ВСН 012-88 разработали такие методики и в то же время не привели их в своем документе, то это свидетельствует о том, что [7] не регламентирует проверку основных параметров РСНП и притертых НСП.

3). Допустимые отклонения значений углов призмы от номинальных приведены для преобразователей в табл. 11. В зависимости от диапазона толщины контролируемых соединений они составляют от 2 до 5°. При наличии таких отклонений изменяются углы ввода, что в свою очередь приведет к изменению предельной чувствительности контроля. Например, допускаемое отклонение -5° при контроле швов толщиной более 26 мм вызовет изменение предельной чувствительности на 65 % ее номинального значения. Авторы [7] не упоминают о корректировке предельной чувствительности при наличии отклонений угла ввода; следовательно, величина этого отклонения будет в значительной мере влиять на оценку качества проконтролированного шва.

4). В п. 5.82 сказано, что шаг поперечного смещения преобразователя при сканировании не должен превышать $1/2$ ширины призмы (как правило, все другие источники шаг сканирования ограничивают размером, равным $1/2$ размера пьезоэлемента). Ширина призмы может в 2 раза и более

превышать размеры (диаметр, длину) пьезоэлемента. Поэтому сканирование с рекомендуемым шагом может привести к пропуску дефектов.

5). По рекомендациям п. 5.84.2 стандартный уровень сигнала на экране дефектоскопа должен устанавливаться на уровне 20 мм. Такой уровень в значительной степени снижает возможности использования технических преимуществ рекомендованных [7] приборов.

6). Мы не располагаем информацией, что какой-либо документ, кроме [7] (см. п. 5.84.3), рекомендует измерять условную протяженность дефектов «при поисковой чувствительности». Все остальные рекомендуют проводить такие измерения, установив контрольный уровень чувствительности. То же самое можно сказать и о рекомендации считать крайними положениями преобразователя при измерении условной протяженности те, при которых уровень сигнала на экране уменьшается до 10 мм.

7). В п. 5.86 авторы применили термин «суммарная условная протяженность непротяженных дефектов», забыв разъяснить, что величиной условной протяженности любого непротяженного дефекта они, очевидно, считают размеры, приведенные в табл. 13 [7].

Пункт 5.87.1 регламентирует, на наш взгляд, ничем не оправданную и непонятную для специалистов последовательность обозначения параметров обнаруженных дефектов: вид по протяженности (буква); «наибольшая» глубина залегания (число); условная протяженность (число); признак допустимости дефекта по амплитуде (буква).

Численное значение амплитуды эхо-сигнала от дефекта авторы [7] не включили в эту последовательность. К сожалению, они не учли тот факт, что большинство организаций, выполняющих УЗК, пользуются понятными и легко поддающимися расшифровке обозначениями дефектов, рекомендованными [5] или [1]. Приведенный в [7] порядок записи параметров дефектов неполный и затрудняет как запись, так и расшифровку этих параметров.

3. О необходимости внесения изменений в ГОСТ 14782-86 [4]. Это основной документ, которым должны руководствоваться как подразделения, выполняющие контроль сварных соединений, так и разработчики НТД на проведение такого контроля. Поэтому качество их работы напрямую зависит от точности и однозначности формулировок, приведенных в [4]. Мы считаем, что отмеченные нами ниже неточности и просто ошибки, очевидно, возникшие на этапе типографского оформления документа, должны быть устраниены авторами ГОСТ 14782-86, и это облегчит труд всех, кто использует его рекомендации в повседневной работе.

1. В п. 1.4 сказано, что образцы СО-1, -2, -3 следует применять для измерения и проверки основных параметров аппаратуры и контроля при эхо-импульсном методе и совмещенной схеме включения преобразователей с плоской рабочей поверхностью (при их ширине до 20 мм). В остальных случаях рекомендовано применять СОП. Но в [4] не содержатся рекомендации, выполнение которых

позволило бы многократно воспроизводить и однозначно трактовать основные параметры, устанавливаемые с помощью этих образцов. Наиболее важными, на наш взгляд, требованиями, которые необходимо было бы привести в документе, являются: конфигурация СОП, типы и оптимальные размеры отражателей, применяемых для определения основных параметров аппаратуры и контроля, а также возможность использования одного и того же отражателя для определения различных параметров. Отсутствие такой регламентации как раз и приводит к неточностям и ошибочным утверждениям в ведомственных документах (примером этого может служить ситуация, описанная в п. 2).

2. В п. 2.7 [4] приведен термин «наибольшая часть развертки», который вызывает ряд вопросов, остающихся без ответа из-за сжатости формулировки и отсутствия соответствующих пояснений в этом пункте.

3. В п. 2.8 даны определения основных параметров контроля (10 наименований). Среди них — мертвая зона и разрешающая способность по дальности и (или) фронту. Ни в одном из образцов, рекомендованных [4], нет отражателей, которые позволили бы определить разрешающую способность по фронту. Что же касается лучевой разрешающей способности, то согласно данным [8] при пересчете расстояний для оргстекла, взятых из разности размеров коаксиальных цилиндрических отражателей образца СО-1 в расстояния для малоуглеродистых сталей, они составляют 5,5 и 11 мм. Современная аппаратура позволяет довести значения лучевой разрешающей способности до 1...3 мм (в случае использования частот 2,5 и 5 МГц). Мертвая зона у современных приборов, как правило, меньше 3 мм, а [4] предусматривает для ее определения только два цилиндрических отражателя — на глубине 3 и 8 мм. Следовательно, [4] не регламентирует порядок определения фронтальной разрешающей способности, не содержит удовлетворительных рекомендаций для определения истинного значения разрешающей способности по дальности и мертвой зоне в случае применения современных приборов.

4. В п. 4.1.2 сказано, что среди основных измеряемых характеристик выявленного дефекта должны быть его координаты в сварном соединении. А п. 4.2.3 устанавливает, что при сокращенном описании дефекта должна указываться «наибольшая глубина залегания». Кроме п. 4.1.2, термин «наибольшая глубина залегания» в [4] нигде не встречается. Не содержатся там и методические указания, как для каждого дефекта конкретного типа этот параметр определяется. Остается только предположить, что «наибольшая глубина залегания дефектов» должна измеряться только в том случае, когда их отражающая поверхность расположена наклонно относительно поверхности ввода ультразвука. Для непротяженных дефектов, а также таких, у которых отражающая поверхность расположена в направлении, параллельном поверхности ввода, авторам [4], очевидно, необходимо было бы рекомендовать измерение координат в том сечении, где зафик-

сирован максимум амплитуды эхо-сигнала и где рекомендовано измерять условные размеры ΔX , ΔH .

5. В пп. 4.2.3, 4.2.4 приведена система сокращенного описания результатов контроля. Система содержит ряд неточностей, которые могут привести к ошибочному описанию обнаруженных дефектов. Эти неточности трудно объяснить иначе, чем ошибками набора в типографии (например, обозначение «ДБ» в конце второго абзаца п. 4.2.3 или определения для дефектов типа Б и Е в п. 4.2.4).

6. Приложение 3 из ГОСТ 14782-86 содержит рекомендации по измерению времени задержки $T_{\text{пп}}$ в призме преобразователя. По этим рекомендациям, используя дефектоскоп УД2-12 [9], установить значение $T_{\text{пп}}$, как правило, не удается. Существует более приемлемая и воспроизводимая методика определения $T_{\text{пп}}$, описанная в [10], которую можно было бы рекомендовать вместо приведенной в приложении 3.

7. В табл. 1 обязательного приложения 8 ГОСТ 14782-86 приведены признаки, которые позволяют разделять дефекты на объемные протяженные и непротяженные. Очевидно, что после неравенств $\Delta L \leq \Delta L_0$ в строке 1 и $\Delta L > \Delta L_0$ в строке 2 необходимо поставить точку с запятой, иначе они читаются совместно с формулами, записанными правее. На чертеже 5 этого же приложения ось ординат ошибочно подписана « N , мм» вместо « l , мм», как это следует из смысла п. 9.

ВЫВОДЫ

1. Показано, что нормы оценки качества, применяемые в диапазоне толщины контролируемых сварных соединений от 10 до 20 мм по РТМ-1С-89 и ОП № 501 ЦД-75, не соответствуют друг другу. Нормы оценки, установленные вторым документом, соответствуют требованиям РТМ-1С-81, который в настоящее время отменен. Требования этих двух действующих документов необходимо привести в соответствие, для чего предложено дать к РТМ-1С-89 дополнение в виде таблицы 16.10 из РТМ-1С-93 (действует на территории РФ), одновременно отменив табл. 16.6.

2. Раздел «Ультразвуковая дефектоскопия» в ВСН 012-88 имеет ограниченный объем и не содержит в отличие от других аналогичных документов описания наиболее важных технологических особенностей контроля сварных соединений трубопроводов. При попытке использования содержащихся в нем указаний и рекомендаций по проведению УЗК у пользователя возникает ряд нерешаемых вопросов и проблем. Мы считаем, что оптимальным вариантом будет замена этого раздела новым, в котором учтены замечания и предложения, высказанные в этой статье.

3. В отдельные положения ГОСТ 14782-86 необходимо внести правки и изменения, которые облегчат и сделают более удобной работу с документом.

4. С учетом возможностей современных приборов и оснастки для УЗК металлов уже давно назрела необходимость замены устаревших и часто несовер-



шенных с момента создания документов, регламентирующих проведение этих работ. Опыт положительного решения такой проблемы есть — ПНАЭ Г-7-030-91 является современным документом, действующим в Минатомэнерго.

Технологические требования к проведению УЗК однотипных объектов во многих отраслях промышленности практически ничем не отличаются друг от друга (например, контроль основного металла и сварных швов трубопроводов и сосудов различного назначения). Поэтому такой документ может быть создан усилиями группы специалистов нескольких отраслей промышленности. Отличия норм оценки качества, существующие в этих отраслях, могут быть вынесены в качестве отдельных таблиц-приложений.

1. *ОП № 501 ЦД-75. Основные положения по ультразвуковой дефектоскопии сварных соединений котлоагрегатов и трубопроводов тепловых электростанций.* — М.: ЦНИИГМАШ, 1977. — 168 с.
2. *Руководящие технические материалы по сварке, термообработке и контролю трубных систем котлов и трубопроводов при монтаже и ремонте оборудования тепловых электростанций (РТМ-1С-81).* — М.: Энергоатомиздат, 1982. — 208 с.

*КП «ХТС», ОАО «Теплоэнергомонтаж»,
Харьков*

3. *РД 34.15.027-89. Сварка, термообработка и контроль трубных систем котлов и трубопроводов при монтаже и ремонте оборудования электростанций (РТМ-1С-89).* — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 255 с.
4. *ГОСТ 14782-86. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые.* — М.: Изд-во стандартов, 1987. — 38 с.
5. *ПНАЭ Г-030-91. Унифицированные методы контроля основных материалов (полуфабрикатов), сварных соединений и наплавок оборудования атомных энергетических установок. Ультразвуковой контроль. Ч. II / ЦНИИАтоминформ.* — М., 1992. — 157 с.
6. *РД 3415.027-93. Сварка, термообработка и контроль трубных систем котлов и трубопроводов при монтаже и ремонте оборудования электростанций (РТМ-1С-93).* — М.: НПО ОБТ, 1994. — 267 с.
7. *ВСН 012-88. Строительство магистральных и промысловых трубопроводов. Контроль качества и приемка работ. Часть I / Миннефтегазстрой.* — М., 1990.
8. *Кретов Е. Ф. Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении.* — С.-Пб.: Радиоэлектроника, 1995. — 327 с.
9. *Дефектоскоп ультразвуковой УД2-12 (2.1). Руководство по эксплуатации ЩЮ2.068.136.РЭ / НПО «Волна».* — Кишинев, 1987. — 146 с.
10. *Методика УЗК с использованием дефектоскопа УД2-12 / Трест «Центрэнергомонтаж».* — М., 1991.

*Поступила в редакцию
15.11.2001*



10–13 сентября 2002 г. в г. Сумы (Украина)
состоится очередная 10-я Международная научно-техническая конференция
"Герметичность, вибронадежность и экологическая безопасность
насосного и компрессорного оборудования" — ГЕРВИКОН•2002.

Тематика Конференции:

Проблемы герметичности: повышение надежности и эффективности уплотнительных устройств роторов насосов и компрессоров, уплотнения неподвижных и аксиально-подвижных соединений, новые материалы и технологии в уплотнительной технике.

Проблемы вибронадежности: динамика роторов центробежных машин, снижение шума и вибрации, вибродиагностика и прогнозирование остаточного ресурса.

Проблемы безопасной эксплуатации оборудования: обеспечение экологически безопасной эксплуатации насосов и компрессоров, проблемы энерго- и ресурсосбережения.

По проблемам безопасной эксплуатации компрессорного и насосного оборудования в рамках конференции пройдет специализированный семинар.

Основные сроки:

28.02.2002 - последний срок подачи заявок на участие в Конференции с докладом;

31.03.2002 - рассылка 2-го инф. сообщения и требований к оформлению текстов докладов;

31.05.2002 - срок подачи полного текста доклада и перечисления оргвзноса;

31.08.2002 - последний срок подачи заявок на участие в Конференции без доклада.

Организационный комитет Конференции ГЕРВИКОН • 2002
 Сумской государственный университет, ул. Римского-Корсакова 2, г. Сумы, УКРАИНА, 40007
 Тел./факс: (0542) 33-35-94
 E-mail: marts@omdm.sumdu.edu.ua; website: www.hervicon.sumy.ua



В УКРАИНСКОМ ОБЩЕСТВЕ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

ВЫСТАВКИ И КОНФЕРЕНЦИИ В УКРАИНЕ

В последние годы в Украине сформировался стабильный календарь выставок и конференций по неразрушающему контролю и технической диагностике.

Начинается выставочный год в Карпатах, в пос. Славское — центре горнолыжного спорта и отдыха — конференцией «Физические методы и средства контроля сред, материалов и изделий — ЛЕОТЕСТ» (ежегодно в середине февраля). Ее организатор — Центр «Леотест-Медиум».

Директор — канд. техн. наук Учанин В. Н.
Адрес: 79017, г. Львов-17, ул. Генерала Грица, д. 11-5
Тел./факс: (0322) 75-08-69
E-mail: leotestorg.lviv.net

Конференция проводилась при поддержке Физико-механического института им. Г. В. Карпенко НАН Украины и Украинского общества неразрушающего контроля и технической диагностики (УО НКТД).

В 2002 г. эта конференция проходила в седьмой раз. В пансионате «Бойківщина», где разместились ее участники, собралось более 60 ученых и специалистов из Украины, России, Беларуси, Молдавии, Литвы и Польши.

Особенно нравится эта конференция тем, кто любит зимние горы, ценит чистый карпатский воздух, ждет встречи со снежными склонами горы Тростян и хочет совместить катание на горных лыжах и профессиональное общение в кругу коллег.

К месту проведения конференции — пос. Славское — можно доехать поездом «Киев-Львов-Ужгород».



Ежегодно (в апреле-мае) ждет участников конференции и выставка «Неразрушающий контроль», организуемая в Киеве Ассоциацией «ОКО».

Директор — Луценко Геннадий Геннадиевич
Адрес: 04111, г. Киев, а/я 31;
Тел./факс: (044) 531-37-26, 531-37-27
E-mail: ndt@carrier.kiev.ua; www.ndt.com.ua

Проводится она при поддержке НПФ «Ультракон-Сервис», Института электросварки им. Е. О. Патона НАНУ и УО НКТД. В 2002 г. конференция и выставка состоятся в шестой раз (место проведения — ИЭС им. Е. О. Патона).

Следует отметить, что эта выставка — наиболее крупная в Украине. В ее работе принимают участие практически все украинские производители и про-

давцы средств дефектоскопии, а также многочисленные гости из России, Беларуси, Молдавии и других стран Европы. В разные годы в выставке участвовали: «Индустрія-Сервис» (Москва), НИИмостов и НПФ «Зонд» (Санкт-Петербург), «Нординкрафт» (Череповец), «Микроакустика» (Екатеринбург), «Термо-АРД» (Москва), «Пергам» (Москва) и другие. Среди гостей из дальнего зарубежья — «Intercontrol» (Франция), «Olympus» и «Kodak» (Япония), «Panametrics», «ABB Amdatta» и «Anser Inc.» (США), «Krautkramer» и «H. Rosen Ingeniring» (Германия), «Sonospection International» и «AEA Technology» (Великобритания), «Inetec» (Хорватия), «Skoda Jam» (Чехия) и другие.

Выставку всегда посещают Президент Академии НАН Украины академик Б. Е. Патон, руководители и ведущие специалисты многих институтов и предприятий Украины. В 2001 г. на выставку приезжал Президент Международного комитета по неразрушающему контролю (IC NDT) д-р Д. Нардони (Италия).

Секционные заседания конференции проходят по отраслевому принципу — рассматривается в целом проблема неразрушающего контроля в отрасли: «НК в энергетике», «НК на железной дороге», «НК в нефтегазовом комплексе», «НК в авиации», «Сертификация персонала НК», «Метрологическое обеспечение НК» и т. п.

Организаторы конференции всегда с радостью встречают своих гостей и предоставляют им хорошие условия для работы и отдыха.



Каждую осень в сентябре–октябре международный семинар-выставка «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики» собирает специалистов в Ялте (Украина). Его организаторы — Украинский информационный центр «НАУКА. ТЕХНИКА. ТЕХНОЛОГИЯ» и НПП «Машиностроение».

Директор центра — Главацкая Зоя Юрьевна
Адрес: 02094, г. Киев-94, а/я 488
Тел./факс: (044) 573-30-40
E-mail: office@seminar.freenet.kiev.ua;
glavackaya@softhome.net

Семинар-выставка в Ялте проходит под эгидой Украинского, Российского и Беларусского обществ неразрушающего контроля и собирает большое число гостей из разных стран. В 2002 г. он будет проходить в десятый раз, в санатории «Дружба»,



расположенном на берегу Черного моря, еще теплого и ласкового в это время года.



В конце осени – начале зимы специалистов приглашают на конференцию НПФ «Ультракон» (Киев). Ее организаторы – Ивано-Франковский государственный технический университет нефти и газа и группа Харьковский предприятий и учебных заведений.

Директор – Павлій Ігорь Вячеславович
Адрес: 03126, г. Київ-126, а/я 507/8
Тел./факс: (044) 484-70-33, 484-03-69
E-mail: ultracon@ukrpack.net

Именно фирма «Ультракон», отметившая в этом году свое 10-летие, организовала и провела инициативную выставку средств неразрушающего контроля в 1993 г. Сейчас НПФ «Ультракон» – одна из ведущих в Украине производителей и поставщиков приборов и средств для НК и ТД.



Один раз в три года проходит научно-техническая Украинская конференция «Неразрушающий контроль и техническая диагностика», организуемая УО НКТД.

Председатель – профессор
Троицкий Владимир Александрович
Адрес: 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11
Тел.: (044) 227-26-66, 261-52-49, 261-51-96
Тел./факс: (044) 220-94-82
E-mail: usndt@ukr.net; www.usndt.com.ua

В 1994, 1997 и 2000 гг. такие конференции проводились в пансионате «Лесной» (Днепропетровск) при поддержке ГКБ «Южное» и ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины.

Следует отметить, что отдельные фирмы, предприятия и организации, предлагающие средства неразрушающего контроля и технической диагностики, размещают свои стенды и на других выставках, например, «Сварка», «Нефть и газ», «Энергосбережение», «Машиностроение» и т. п.

Все организаторы выставок и конференций приглашают Вас в Украину. Мы рады будем познакомиться с Вами и с продукцией Ваших фирм.

КОНФЕРЕНЦІЯ «ФІЗИЧНІ МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ КОНТРОЛЮ СЕРЕДОВИЩ, МАТЕРІАЛІВ ТА ВИРОБІВ»

З 18 по 22 лютого 2002 р. в с. Славське Львівської області пройшла чергова щорічна конференція ЛЕОТЕСТ-2002 «Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів», організована Центром «Леотест-Медіум» (керівник – канд. техн. наук Учанін Валентин Миколайович) при підтримці Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України та Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики.

В одному з найкрасивіших куточків Карпат, біля піdnїжжя засніженої гори Тростян, зібралось більш як 60 вчених та спеціалістів з різних міст України, Росії, Білорусі, Молдови, Литви та Польщі.

На конференції були представлені доповіді від провідних науково-дослідних, учебних та виробничих організацій цих країн. Серед них:

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

Санкт-Петербургський державний електротехнічний університет;

НДІ мостів та дефектоскопії та НВФ «Зонд», Санкт-Петербург;

Інститут прикладних проблем техніки, Варшава;

Національний університет ім. Тараса Шевченка, Київ;

Національний університет ім. Івана Франка, Львів;

Національний технічний університет України «КПІ», Київ;

Національний університет радіоелектроніки, Харків;

Івано-Франківський національний технічний університет нафти та газу;

Національний університет «Львівська політехніка», Львів;

Дніпропетровський національний університет;

Дніпропетровський державний технічний університет залізничного транспорту;

ГПУ «Львівгазвидобування» та ДП «Укрогрехтдіагностика», Львів;

НВФ «Спеціальні Наукові Розробки», Харків;

Інститут геологічних наук НАН України, Київ;

Київський та Львівський НДІ судових експертіз та інші.

Доповіді конференції видано окремою збіркою. З нею можна ознайомитись в Оргкомітеті конференції, що розташований в Центрі «Леотест-Медіум» (79017, м. Львів-17, вул. Генерала Грицая, 11-5; тел./факс: (0322) 75-08-69, E-mail: leotest@lviv.ua) або в Українському товаристві неруйнівного контролю та технічної діагностики (03680, Київ-680, вул. Боженко, 11, ІЕЗ ім. Є. О. Патона, тел. (044) 261-51-96).

Ю. М. Посипайко,
Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона, Київ



НПФ «УЛЬТРАКОН» — 10 лет

3 марта 2002 г. Научно-производственная фирма «УЛЬТРАКОН» отметила свое десятилетие.

Фирма «УЛЬТРАКОН» создана в 1992 г. группой единомышленников. Задача предприятия — комплексное обеспечение потребителей материалами и оборудованием для НК и ТД. За это время НПФ «УЛЬТРАКОН» стала одним из ведущих в Украине производителем и поставщиком приборов и средств для НК и ТД.

Сегодня группа компаний «УЛЬТРАКОН» имеет в своем составе четыре самостоятельных структурных подразделения, каждое из которых специализируется в определенной области НК и ТД:

- ❖ «УЛЬТРАКОН» — продажа и сервисное обслуживание приборов и оснастки для ультразвукового, рентгеновского и других методов контроля.

- ❖ «УК-Тест» — разработка и производство приборов и оснастки для НК и ТД.

- ❖ «Диагностические приборы» — расходные материалы для рентгенографии, капиллярной, магнитной дефектоскопии и других методов неразрушающего контроля.

«ДП-Тест» — оборудование для рентгенографии, капиллярной и магнитной дефектоскопии, оборудование для вибродиагностики.

Основными направлениями работы «УЛЬТРАКОН» являются:

- ❖ НИР в области неразрушающего контроля;
- ❖ комплексное обеспечение предприятий Украины средствами НК и ТД;
- ❖ производство приборов и оснастки для неразрушающего контроля;
- ❖ обучение специалистов.

Персонал компании находится в постоянном творческом поиске. Только за последний год наложен серийный выпуск двух новых приборов: ультразвукового толщинометра УТ-31 и динамического твердомера ТД-32. Всего же на счету «УЛЬТРАКОН» — десятки разработок в области НК.

Тысячи предприятий и организаций Украины различных отраслей промышленности убедились в профессионализме и компетентности сотрудников «УЛЬТРАКОН». Среди них — предприятия нефтегазовой отрасли, большинство украинских АЭС, ГРЭС и ТЭЦ, Южный машиностроительный завод, «АЗОВМАШ», «АЗОВСТАЛЬ», «Мотор-Сич», Нижнеднепровский трубопрокатный завод, судостроительные заводы, АНТК «АНТОНОВ»,

ПО «Заря», НПП «Машпроект», ЗАО «Укргазстрой», ЗАО «Нефтегазстрой», Магистральные нефтепроводы «Дружба», различные строительно-монтажные организации, экспертно-технические центры Госнадзора охранруды Украины и многие другие.

«УЛЬТРАКОН» известен и за пределами нашей страны. Компания сотрудничает со многими исследовательскими и производственными организациями в России, Молдове и Беларуси. Налажено деловое сотрудничество со многими фирмами. В частности, «УЛЬТРАКОН» является официальным представителем фирм «СТРЕСТЕЛ» (США) и «БОТУМ» (Молдова), ЗАО «КОНСТАНТА», НПФ «ТЕХНОТЕСТ», НПФ «ИНТРОН+» (Россия) — производителей оборудования для ультразвуковых методов контроля.

Подразделение «Диагностические приборы» является представителем ведущих производителей технических рентгеновских пленок, а также официальным представителем МР-ХЕМИ (Германия) — производителя оборудования и расходных материалов для магнитного и капиллярного методов контроля. «ДП-Тест» является официальным представителем «ВАСТ» (Россия) — ведущего производителя систем вибродиагностики. У предприятий группы сложились плодотворные деловые отношения с ведущими изготовителями оборудования и материалов для контроля в Германии, Великобритании, Италии, Бельгии и других стран.

Являясь коллективным членом УО НКТД, «УЛЬТРАКОН» активно участвует в его работе. Ни одна престижная выставка или крупный семинар в области НК не обходится без участия специалистов этой фирмы. «УЛЬТРАКОН» на постоянной основе помогает УО НКТД в издании Бюллетеня информационных материалов по ТД и НК, а также осуществляет активную финансовую поддержку журнала «Техническая диагностика и неразрушающий контроль».

Фирма оказывает услуги по НК промышленных объектов с применением самых современных средств (тепловых, ультразвуковых методов контроля).

«УЛЬТРАКОН» оказывает помощь вузам Украины в вопросах обеспечения нормативно-технической документацией, учебной литературой, приборами для модернизации учебного процесса.

Редакция и редколлегия журнала «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» от всего сердца поздравляют коллектив НПФ «Ультракон» с десятилетием и желают новых трудовых и творческих свершений, счастья и благополучия!



«ПРОМЫШЛЕННЫЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ 2002» — ПОДВЕДЕНИЕ ИТОГОВ

10-12 АПРЕЛЯ 2002 г., Москва



С 10 по 12 апреля 2002 года в Центре Международной Торговли успешно стартовала Первая международная специализированная выставка приборов и оборудования для неразрушающего контроля «ПРОМЫШЛЕННЫЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ».

Организаторы выставки — выставочные компании «Примэкспо» и «ITE Group Plc», реализующие ежегодно 17 крупномасштабных проектов в Москве и Санкт-Петербурге, и Российское Общество по Неразрушающему Контролю и Технической Диагностике (РОНКТД).

«ПРОМЫШЛЕННЫЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ» проходила при поддержке Министерства промышленности, науки и технологий РФ, Государственного комитета по стандартизации и метрологии РФ, Федерального горного и промышленного надзора России, Управления по надзору за качеством и технической безопасностью оборудования для ядерно- и радиационно-опасных объектов, НТЦ «Промышленная безопасность».

В выставке приняли участие более 60 компаний, представивших приборы и оборудование российских и зарубежных производителей. Общая экспозиционная площадь составила 1 000 квадратных метров. Вниманию специалистов были предложены следующие тематики:

- Ультразвуковой контроль
- Контроль методом акустической эмиссии
- Визуальный и оптический контроль
- Магнитопорошковый контроль
- Электромагнитный контроль
- Вибрационный контроль
- Инфракрасный и термический контроль
- Радиографический контроль
- Течеискание
- Контроль трубопроводов
- Обучение и сертификация персонала, аттестация лабораторий

В 2003 году планируется тематическое расширение выставки за счет компаний-участников, специализирующихся на разработке и производстве приборов ядерного и радиационного контроля.

Можно с уверенностью утверждать, что выставка «ПРОМЫШЛЕННЫЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ» прошла с полным аншлагом. Организаторами было зарегистрировано около 5 000 посетителей из регионов России, стран СНГ и стран ближнего и дальнего зарубежья. В результате, у многих участников в первый же день выставки закончились подготовленные рекламные материалы, а у стендов в буквальном смысле «негде было упасть яблоку». Особенно порадовал участников тот факт, что более 70 % посетителей представляли крупные региональные промышленные предприятия.

В рамках выставки 10-11 апреля 2002 г. состоялась конференция по вопросам использования методов неразрушающего контроля и технической диагностики в промышленности. Наибольший интерес среди заявленных участников и гостей выставки вызвали доклады Президента РОНКТД В.В. Клюева «Диагностика безопасности» и начальника управления Госгортехнадзора России В. С. Котельникова «Использование технологий неразрушающего контроля для повышения безопасности и надежности промышленных объектов». Всего на конференции было представлено 28 докладов.

В будущем году одновременно с выставкой будут работать параллельно 3 конференц-зала, в которых пройдут специализированные семинары, разделенные по тематикам докладов. Таким образом, специалисты различных отраслей промышленности смогут выбрать именно тот семинар, который наиболее будет соответствовать профилю их деятельности.

Выставка и конференция привлекли внимание технических специалистов практически всех отраслей промышленности. Это и нефтехимия (*ЛУКОЙЛ, Газпром, Роснефть, Белоруснефть*), энергетика (*региональные ТЭЦ, электросети, крупнейшие предприятия энергомашиностроения*), металлургия (*Северсталь, Ижсталь, Челябинский трубопрокатный завод, Синарский трубный завод, ТМК*).

Крупнейшим потребителем приборов НК являются железные дороги. Помимо представителей Московской железной дороги, выставку посетили официальные делегации Дальневосточного, Свердловского, Саратовского, Самарского, Северо-Кавказского железнодорожных управлений.

По количественному соотношению зарегистрированных представителей различных отраслей промышленности, которые посетили «ПРОМЫШЛЕННЫЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ», получены следующие данные: нефтехимия (20 % посетителей), металлургия и металлообработка (15 %), электроэнергетика (13 %), топливно-энергетический комплекс (13 %), авиастроение (10 %) и автомобилестроение (8 %), строительство (9 %), приборостроение (8 %), станкостроение (6 %), транспорт (3 %), судостроение (8 %), другие отрасли (2 %).

В течение 3-х выставочных дней все компании-участники этого года подали заявки на участие в 2003 году. Факторами, повлиявшими на такое решение, назывались: прекрасная организация и грамотно спланированная рекламная компания выставки (*обширная рассылка пригласительных билетов по предприятиям, использующим приборы НК на производстве*), высокая активность потенциальных заказчиков и количество заинтересованных специалистов высокого уровня из различных отраслей промышленности, широкий спектр представленных тематик, насыщенная деловая программа, актуальность и важность вопросов, освещенных на семинарах и др. Большинство экспонентов отметили, что узкая специализация данной выставки предоставила им уникальную возможность встретиться непосредственно с теми специалистами, которые используют приборы неразрушающего контроля (*метрологами, сотрудниками лабораторий, сварщиками*).

Участники «ПРОМЫШЛЕННЫЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ 2002»:

Bycosin AB, CCS Services, Olympus Moscow LLC, Physical Acoustics Russia, Votum, Алтек, Алтес МНТП, Алькор НПО, Альфа-Аконис, ВАСТ, ВНИИСТ-Политест, Вторпродукт, Диагност, Индустрия-Сервис, Инкотес, Институт прикладной физики, Интек, Интерюнис, Интрон Плюс, Интроскоп, Карат НПП, КИД, Константа, ЛУЧ НПК, Магнит Плюс, МедФом, МЕТ, Нординкрафт, Панатест, Пергам, Пик и К, Прибор ФНПЦ, Радиан, Роботест, С-Инструментс, Спектр МНПО, Спектрофлэш, Стройприбор, Технотест-М НПП, Ультратест, Технические системы и технологии, Центр высоких технологий, Центр диагностики, ЦНИИТМАШ, Эксперт-Центр, Элтест, Энергодиагностика, Эхо +. В конференции принимал участие журнал «Техническая диагностика и неразрушающий контроль» (Украина, Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины).

Для расширения состава участников и привлечения иностранных компаний, организаторы планируют провести презентацию «NDT Russi — ПРОМЫШЛЕННЫЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ» на 8-й Европейской конференции и выставке «NON-DESTRUCTIVE TESTING», которая состоится в Барселоне (Испания) с 17 по 21 июня 2002 года.



Организационный комитет выставки:
Тел.: +7 (812) 380 60 02, 380 60 00
Факс: +7 (812) 380 60 01
E-mail: maria@primexpo.spb.ru
<http://www.primexpo.spb.ru/ntd>



Торжественное открытие конференции Президентом РОНКТД В. В. Клюевым



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕМИНАР «ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ ГАЗОТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ УКРАИНЫ»

11–15 марта 2002 г., Киев

Украина входит в число стран с развитой газовой промышленностью. От ее стабильной работы зависит стабильность и развитие национальной экономики, а также надежность поставок природного газа в другие страны Европы. Основу этой отрасли промышленности составляет газотранспортная система, включающая магистральные газопроводы, газопроводы-отводы и распределительные газопроводы, а также компрессорные и газораспределительные станции. Общая длина магистральных газопроводов на территории Украины составляет около 35000 км. Почти 60 % газопроводов эксплуатируются уже от 15 до 50 лет. Около 6000 км газопроводов отработали свой амортизационный срок – 33 года. Решение технических проблем, возникающих в связи с необходимостью продления остаточного ресурса магистральных газопроводов, является важнейшей государственной задачей. Необходимо объединение и координации усилий многих коллективов ученых и специалистов, работающих в этой области.

С 11 по 15 марта 2002 г. Научно-технический комплекс «Институт электросварки им. Е. О. Патона» Национальной Академии наук Украины совместно с ДК «Укртрансгаз» провели научно-технический семинар «Повышение эксплуатационной надежности линейной части магистральных газопроводов газотранспортной системы Украины».

Семинар прошел в рамках Проекта Программы развития ООН «Обмен технологической информацией в Украине для поддержки экономических реформ». Семинар проводился уже во второй раз (первый раз – в феврале–марте 2001 г.). Газотранспортники, ведущие ученые и специалисты Украины с участием российских специалистов рассмотрели и обсудили технические проблемы и новейшие разработки, а также определили направления развития в области диагностики, мониторинга, ремонтных технологий, реконструкции газопроводов Украины.

На 9 секциях семинара представлено 39 докладов. Были рассмотрены современные технологии, оборудование и материалы для:

- ремонта и восстановления деталей и узлов газораспределительных систем с помощью сварки, резки и термообработки,
- контроля и обеспечения качества металлов и сварных соединений,
- коррозионной защиты трубопроводов, а также современное состояние техники безопасности, нормативной базы в области строительства и эксплуатации газопроводов. Кроме того, представлено 30 докладов, посвященных вопросам эксплуатации газопроводов.

В семинаре приняли участие представители 23 организаций и предприятий.

В докладах от *ИЭС им. Е. О. Патона* и *УкрНИИгаз* представлены технологии восстановления несущей способности линейной части магистральных газопроводов и присоединения отводов к основной магистрали в условиях эксплуатации.

Безопасные и высокопроизводительные взрывные труборезы для проведения ремонтных работ на газопроводах в трассовых условиях рассмотрены в докладе от *ИЭС им. Е. О. Патона*. Труборезы успешно прошли комплексные испытания и рекомендованы к промышленному применению.

ЗАО «Укрспецтерм» были представлены технологии, материалы и оборудование для термитной и ударно-конденсаторной сварки выводов системы электрохимической защиты на действующих и строящихся газопроводах, а также на объектах добычи и подземного хранения газа. Эта технология позволяет также оперативно устанавливать системы заземления и защиты от молний.

ГНПП «Полимерсервисмаш» и *ИЭС им. Е. О. Патона* проинформировали о технологиях ликвидации негерметичности запорной арматуры и газотермического напыления изношенных деталей этой арматуры, которые позволяют восстанавливать работоспособность дорогостоящего оборудования.

Один из интереснейших докладов был посвящен разработанным в *ИЭС им. Е. О. Патона* современным компьютерным модулям технологической и медицинской поддержки при ремонтно-восстановительных работах и экстремальных ситуациях на газопроводах с использованием Интернет-технологий управления.

В докладе *ВНИИмонтажспецстрой* рассмотрен опыт создания и применения местной контролируемой термообработки трубопроводов гибкими электронагревателями сопротивления при сооружении газопровода «Голубой поток» (Россия – Турция). Технологии сварки и резки взрывом при ремонте и техническом обслуживании магистральных газопроводов представлены в докладе от *ИЭС им. Е. О. Патона*.

Технология высокоскоростной термогазоабразивной очистки поверхности трубопроводов под антикоррозионные покрытия описана в докладе *Научного центра ВВС Украины, ОКБ «Пилот» и Дрогобычского машиностроительного завода*.

Специализированные сварочные аппараты для монтажа и ремонта трубопроводов и работы в полевых условиях представлены в докладах сотрудников *ИЭС им. Е. О. Патона*, *ОЗСО НТК «ИЭС им. Е. О. Патона»* и концерна *«ESAB»*, а также рассмотрены современные сварочные элек-



троды, рекомендуемые к использованию при ремонтных работах на газопроводах.

ИЭС им. Е. О. Патона представил методику и приборы на основе микропроцессорных систем для мониторинга коррозии газопроводов. Предложены также метод контроля эффективности электрохимической защиты по точкам наибольшей коррозионной опасности и цифровой прибор контроля коррозионной активности грунта.

Вниманию участников семинара предложены установки для катодной защиты от коррозии (ООО «Аквитас») и методы оптимизации параметров катодной защиты (*Институт прикладной геофизики НАНУ*).

Современные методы и диагностические системы для контроля качества конструкций и узлов газопроводов: на основе акустической эмиссии при изменении давления, на основе ультразвука, в том числе без удаления антикоррозионного покрытия, были рассмотрены в докладах от *ИЭС им. Е. О. Патона*.

Были представлены перспективные методы и аппаратура: магнитного коэрциметрического контроля усталостного состояния и ресурса металлоконструкций (*НПФ «Специальные Научные Разработки»*), остаточных напряжений в металлах методом сканирования переменным электрическим током (*НПЦ «Контакт»*).

Переносные рентгеновские аппараты для использования при строительстве и ремонте газопроводов были предложены ЗАО «*Индустрия-Сервис*», а оборудование для внутритрубной очистки и ультразвуковой диагностики — компанией «*Розен-Европа*».

Подробно рассмотрены методы комплексной диагностики и опыт их применения на подводных участках газопроводов (*АО «Трест Подводтрубопровод»*) и на аммиакопроводе (ООО «*ИПП-Центр*»).

В докладе представителей *Института геофизики (предприятие квантовых гравиградиентометров)* описан опытный образец гравиградиентометра для дистанционного контроля изменения плотности материалов газопроводов и грунтов в месте их залегания или прокладывания. Прибор позволяет выявлять разломы, трещины и пустоты в грунте и крупные дефекты в трубах, а также прогнозировать возможные разрушения трубопроводов и сейсмическую обстановку.

В докладах ООО «*ИПП-Центр*» обоснованы новые нормы опасности дефектов и разработаны аналитические методы оценки предельного вязкого состояния металлов с трещиноподобными и коррозионными дефектами и представлена методика численного анализа влияния подвижек грунтов на напряженное состояние трубопроводов.

Выполнена оценка качественных характеристик труб аварийного запаса (совместный доклад *ИЭС им. Е. О. Патона и ДК «Укртрансгаз»*). Установлено, что в процессе длительного хранения существенного изменения основных служебных характеристик материала труб из нормализованной и горячекатаной стали не происходит.

Технике безопасности были посвящены доклады о современных средствах защиты при выполнении ремонтных сварочных работ (*ИЭС им. Е. О. Патона*) и о взрывобезопасном слесарном инструменте, превосходящем по техническим характеристикам лучшие зарубежные аналоги (*НТЦ «Булат НВР»*).

В докладах от *ИЭС им. Е. О. Патона* было представлено состояние нормативной базы в области создания, эксплуатации и ремонта магистральных газопроводов. Разработаны ВСН (Ведомственные Строительные Нормы) «Трубы для строительства, реконструкции и ремонта магистральных газопроводов», «Сварка и контроль качества сварных соединений при сооружении магистральных газопроводов». Разработан проект ДСТУ «Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии», а также проект ВСН о порядке присоединения выводов электрохимической защиты на строящиеся трубопроводы и трубопроводы, находящиеся под давлением. Разработан СТП по расчету катодной, протекторной и дренажной защиты линейной части, промышленных площадок и других объектов магистральных газопроводов. Подготовлены предложения по использованию в Украине некоторых нормативных документов Российской Федерации (СНиП «Магистральные газопроводы», методика оптимальной дренажной защиты магистральных газопроводов от коррозии буждающими токами и др.).

На основе национальных и международных стандартов был рассмотрен порядок подтверждения соответствия технологических процессов сварки ответственных конструкций с целью обеспечения качества и безопасности, вопросы сертификации сварочного оборудования и услуг (*ГП НТЦ «СЕПРОЗ» и ИЭС им. Е. О. Патона*). Одновременно с семинаром в Институте электросварки им. Е. О. Патона проходила выставка сварочного оборудования и материалов, приборов контроля и мониторинга, новых материалов для ремонта газопроводов. Свои разработки экспонировали 12 организаций и предприятий: ИЭС им. Е. О. Патона (Киев), ГВП «Экотехнология» (Киев), ОАО «СЭЛМА» (Симферополь), НПФ «Специальные Научные разработки» (Харьков), Торговый дом «Ниса» (Киев), ЗАО «Индустрия-Сервис» (Москва), ООО «Полипромсинтез» (Киев) и др.

Участники семинара определили следующие приоритетные направления развития научно-технических работ:

- создание современной нормативно-технической базы;
- разработка компьютерных систем диагностики и коррозионного мониторинга;
- определение и продление остаточного ресурса эксплуатации различных элементов трубопроводных систем;
- совершенствование технологий капитального и текущего ремонта газопроводов;
- совершенствование системы подготовки и аттестации специалистов по сварке и диагностике трубопроводов.

А. А. Кайдалов, д-р техн. наук
Инновационный центр «Технологии и материалы»



12 квітня 2002 р. виповнилося 50 років Зіновію Теодоровичу НАЗАРЧУКУ, доктору фізико-математичних наук, професору, члену-кореспонденту Національної академії наук України, заступнику директора з науково-дослідної роботи Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України (м. Львів).

Зіновій Теодорович народився у 1952 р. в м. Львові. 1974 р. з відзнакою закінчив фізичний факультет Львівського державного університету ім. Івана Франка. Наукову діяльність почав 1976 р. старшим інженером Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України. З 1982 р. працював на різних наукових посадах. У 1982 р. захистив кандидатську дисертацію, а в 1990 р. — докторську на тему «Чисельне розв'язування двовимірних задач дифракції методом сингулярних інтегральних рівнянь». У 1995 р. його обрано членом-кореспондентом Національної академії наук України, 1998 р. — присуджено звання професора. З 1991 р. керує науковим відділом «Фізико-математичних основ неруйнівного контролю та діагностики».

Зіновій Теодорович — відомий вчений в галузі радіофізики, технічної діагностики і неруйнівного контролю матеріалів. Ним створена теорія взаємодії зондуючої хвилі з системою довільних тріщиноподібних макродефектів конструкційного матеріалу, розвинуті методи аналізу тонкої структури дифрагованих полів, а також методологічні основи дефектометрії та структуроскопії. Він вніс значний внесок у дослідження резонансного розсіяння хвиль проміжкового частотного діапазону на дефектах у діелектричних матеріалах та взаємодії з системи довільно орієнтованих підповерхневих тріщин у металах.

З. Т. Назарчуком вперше запропоновано нові прямі чисельні методи розв'язання дифракційних задач, виходячи з сингулярних інтегральних рівнянь, а також конструктивна теорія дифракції, ефективна в широкому хвильовому діапазоні — від квазістатики до квазіоптики. Застосуванню цієї теорії до моделювання реальних фізичних параметрів тонких діелектричних і металічних покрівель, розв'язанню прикладних задач неруйнівного контролю присвячена монографія З. Т. Назарчука «Численное исследование дифракции волн на цилиндрических структурах» (Київ, Наукова думка, 1989).

Під керівництвом Зіновія Теодоровича з 1991 р. в інституті розгорнуто комплекс фундаментальних робіт з теорії неруйнівного контролю конструкційних матеріалів, розробки критеріїв оцінки стану матеріалу в процесі експлуатації при дії зовнішніх навантажень і робочих середовищ. Отримані результати узагальнені у виданій у 2001 р. під редакцією З. Т. Назарчука монографії-довіднику «Неруйнівний контроль і технічна діагностика».

Творчий доробок З. Т. Назарчука складається з більш як 150 наукових робіт, у тому числі трьох монографій. Його наукові досягнення відзначенні Державною премією України у галузі науки і техніки (1995 р.) та премією ім. К. Д. Синельникова НАН України (2000 р.).

З. Т. Назарчук — член редколегій трьох міжнародних наукових журналів — «Фізико-хімічна механіка матеріалів» (м. Львів), «Electrodynamics and Technique of Microwave and EHF» (м. Москва), «Радіофізика і радіоастрономія» (м. Харків). З 1996 р. він очолює редколегію міжвідомчого науково-технічного збірника «Відбір і обробка інформації».

Свідченням міжнародного авторитету З. Т. Назарчука як вченого є обрання його головою Програмного комітету VI-ї Міжнародної конференції з математичних методів в електромагнітній теорії (ММЕТ-96). Він член правління Українського відділення міжнародного радіосоюзу — URСI (1994 р.) та Українського товариства з неруйнівного контролю і технічної діагностики (1994 р.). Його обрано також членом Міжнародного інституту інженерів-радіофізиків IEEE (1994 р.), Міжнародного конгресу з механіки руйнування ICE (1991 р.), Європейського товариства з цілісності конструкцій ESIS (1993 р.), Національного комітету України з теоретичної і прикладної механіки (1994 р.), Українського товариства з механіки руйнування (1993 р.).

Привітний та доброзичливий до всіх Зіновій Теодорович вдало поєднує широку наукову та науко-організаційну діяльність з педагогічною роботою, передаючи свої знання студентам і молодим вченим. Він професор Національного університету «Львівська політехніка», під його науковим керівництвом підготовлено та захищено п'ять кандидатських і три докторських дисертацій.

Від щирого серця вітаємо Зіновія Теодоровича з золотим ювілеєм! Бажаємо міцного здоров'я та нових творчих успіхів на науковій ниві!

Дирекція та співробітники Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України
Правління Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики
Редакція та редколегія журналу «Технічна діагностика та неруйнівний контроль»